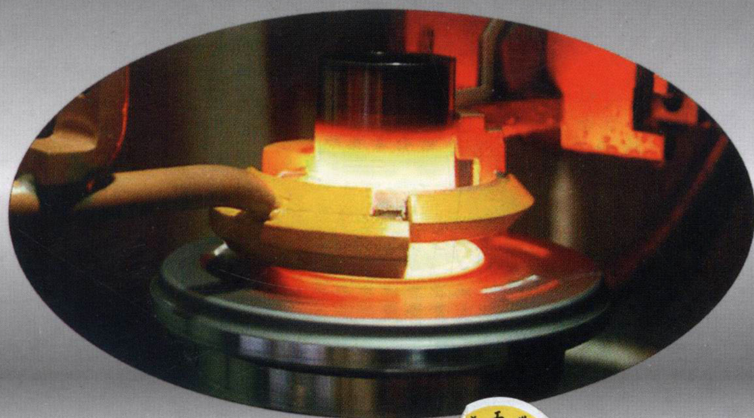
感应热处理技术300问

沈庆通　黄　志　编著







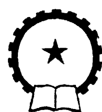
机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

VISIT…

LANZAROTE
Caliente.com

感应热处理技术300问

沈庆通　黄志　编著



机 械 工 业 出 版 社

本书以问答的形式全面系统地介绍了感应热处理技术。其主要内容包括：感应加热物理基础、感应加热电流频率的选择与电源功率的估算、钢铁感应热处理工艺基础、感应淬火件的力学性能与结构设计、感应热处理的工艺调整与典型零件感应热处理工艺、感应淬火件的质量检验与控制、感应器的设计与制造、感应淬火机床的结构与性能，共计300多个问题。本书深入浅出，简明扼要，图文并茂，实用性和针对性强。

本书适合于从事感应热处理工艺、装备设计的技术人员及操作人员阅读，也可供相关专业在校师生及研究人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

感应热处理技术300问/沈庆通，黄志编著．—北京：机械工业出版社，2013.4（2014.5重印）

ISBN 978-7-111-42072-9

Ⅰ．①感…　Ⅱ．①沈…②黄…　Ⅲ．①感应热处理－问题解答　Ⅳ．①TG156.99－44

中国版本图书馆CIP数据核字（2013）第069810号

机械工业出版社（北京市百万庄大街22号　邮政编码100037）
策划编辑：陈保华　责任编辑：陈保华　版式设计：霍永明
责任校对：张　媛　责任印制：乔　宇
北京机工印刷厂印刷（三河市南杨庄国丰装订厂装订）
2014年5月第1版第2次印刷
169mm×239mm ·15.5印张·310千字
3 001—4 000册
标准书号：ISBN 978-7-111-42072-9
定价：35.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务	网络服务
社服务中心：（010）88361066	教材网：http：//www.cmpedu.com
销售一部：（010）68326294	机工官网：http：//www.cmpbook.com
销售二部：（010）88379649	机工官博：http：//weibo.com/cmp1952
读者购书热线：（010）88379203	**封面无防伪标均为盗版**

前　　言

20多年前，编者在机械工业出版社出版了《感应热处理问答》，该书以其内容简明、扼要而颇受一些读者所青睐。20多年过去了，国内外感应热处理无论工艺、标准或设备均有很大改进。编者几十年来一直从事感应热处理专业，接触到国内外本专业的一些资料、装备、信息及发展中的问题。出于对年青感应热处理工作者的责任感，触发了老牛奋蹄的想法，在《感应热处理问答》的基础上增添了新工艺、新装备、新标准等新内容，删去了过时淘汰的装置部分，编写了这本《感应热处理技术300问》。

1960年，美国出版了C. A. Tudbury编写的《BASICS OF INDUCTION HEATING》一书。该书以其通俗易懂、图文并茂的特点，在国际感应加热行业中备受关注。因此，优秀的技术图书内容应简明实用、通俗易懂。我国感应热处理专业书籍不多，新资料和为一线工作者服务的专业技术图书更少，一线感应热处理工作者由于缺乏专业培训，接触面窄等诸多原因，常会在摸索中工作与多走弯路，影响了工作进展。

编者根据自己几十年的工作实践及相关技术文献、读者咨询等，历时近三年，编写了这本书。这本书是一本入门级的感应热处理专业技术图书，图表丰富，便于读者阅读参考。

本书由沈庆通、黄志编著。由于编者水平有限，虽然刻意严谨，但仍会有错误，希望读者能不吝赐教。在本书编写过程中，得到了张宗杰、武瑞、王健、李红莉、张晓、何松志、李志超、梁朋涛、杨继贤、于静、孙藏莲等同志的大力支持，V. S. Nemkov、李韵豪、林信智、万光有等专家对本书的出版备加关注，在此一并致谢！

沈庆通

目　录

前言
第 1 章　感应加热物理基础 …… 1
1. 什么是电磁感应现象？ …… 1
2. 什么是趋肤效应？ …… 2
3. 什么是邻近效应？ …… 2
4. 什么是环状效应？ …… 3
5. 什么是有磁路存在时的趋肤效应？ …… 3
6. 什么是工频、高频、中频、超音频、超高频电流？ …… 4
7. 什么是电流透入深度？ …… 5
8. 电流透入深度由浅入深是如何变化的？ …… 6
9. 电流透入深度是否就是淬硬层深度？ …… 6
10. 什么是透入式加热？什么是传导式加热？哪种加热类型较好？ …… 7
11. 透入式加热对节能、提高经济效益有何意义？ …… 8
12. 什么是磁场？ …… 9
13. 磁力线的作用是什么？ …… 9
14. 什么是磁导率？ …… 9
15. 什么是磁场强度？ …… 10
16. 什么是磁感应强度？ …… 10
17. 什么是磁通？ …… 10
18. 什么是磁阻？ …… 10
19. 什么是磁能？ …… 10
20. 什么是横向磁场加热？它的感应器是什么样的？ …… 10
21. 什么是纵向磁场加热？它的感应器是什么样的？ …… 11
22. 什么是闭合磁路加热感应器？ …… 11
23. 什么是开启式磁路加热感应器？ …… 12
24. 什么是纵向回线加热感应器？ …… 12
25. 什么是软磁材料？ …… 12
26. 铁磁材料有哪些特性？ …… 12
27. 什么是电容量？ …… 12
28. 什么是涡流损耗？ …… 13
29. 什么是磁滞损耗？ …… 13
30. 什么是无功功率？ …… 13
31. 什么是功率因数？ …… 13

32. 什么是视在功率？ …… 13
33. 什么是有功功率？ …… 13
34. 什么是磁屏蔽？ …… 13
第 2 章　感应加热电流频率的选择与电源功率的估算 …… 15
35. 电流频率选择的原则是什么？ …… 15
36. 电流频率选择时，是否都要进行计算？ …… 18
37. 齿轮的电流频率如何选取？ …… 19
38. 齿轮单频法选频的新的数据有哪些？ …… 20
39. 凸轮加热时是否有特殊的频率计算公式？ …… 21
40. 电流频率的选择对淬火零件的强度有何影响？ …… 21
41. 双频加热有哪几种方式？应用在哪些零件上？ …… 21
42. 钢管焊缝用感应加热退火，应如何选择电流频率？ …… 22
43. 钎焊刀具时，如何选择电流频率？ …… 22
44. 钢材透热时电流频率应怎样选择？ …… 22
45. 钢管与铜管加热时如何选择电流频率？ …… 23
46. 非铁金属感应加热时如何选择频率？ …… 24
47. 不同硬化层深度与不同直径零件的电流频率如何选择？ …… 25
48. 最先进的选择电流频率的方法是什么？ …… 25
49. 什么是 GP 型高频电源？ …… 26
50. 什么是 CYP 超音频电源？ …… 27
51. 什么是 KGPS 晶闸管中频电源？ …… 28
52. 什么是 IGBT 晶体管电源？ …… 28
53. 什么是 MOSFET 晶体管电源？ …… 29
54. 什么是便携式感应加热电源？ …… 30
55. 什么是超高频电源？ …… 30
56. 什么是功率密度？它与单位功率是否相同？ …… 30
57. 如何根据工件技术要求选用合适的功率密度？ …… 30
58. 高、中频电源装置的功率怎样选定？ …… 30
59. 典型零件如何根据技术要求计算所需功率与选择电源设备？ …… 40
60. 如何进行功率估算？ …… 41
61. 如何根据轴颈与淬硬层深度选择功率密度与扫描速度？ …… 42
62. 如何对正火后的齿轮进行感应淬火功率估算？ …… 42
63. 设备额定功率不够时，如何感应加热超大工件？ …… 42
64. 感应热处理是否有电耗定额？ …… 43
65. 如何配置中频电热电容器？ …… 43
66. 国产电热电容器有哪些型号与规格？ …… 44
67. 如何配置中频淬火变压器？ …… 44
第 3 章　钢铁感应热处理工艺基础 …… 47

68. 钢铁感应热处理的金属学基础是什么？ …… 47
69. 什么是奥氏体？ …… 49
70. 什么是铁素体？ …… 49
71. 什么是渗碳体？ …… 50
72. 什么是珠光体？ …… 50
73. 什么是莱氏体？ …… 50
74. 什么是马氏体？ …… 51
75. 什么是临界冷却速度？ …… 51
76. 什么是本质细晶粒钢？ …… 51
77. 钢的晶粒度大小对力学性能有何影响？ …… 52
78. 感应热处理常用钢牌号有哪些？ …… 52
79. 感应淬火对钢有哪些要求？ …… 53
80. 钢中诸元素对钢感应淬火各有何种作用？ …… 54
81. 钢的不同原始组织对感应淬火有何影响？ …… 55
82. 为什么说钢中存在带状组织不适于感应淬火？ …… 56
83. 感应热处理有哪些金属学的特点？ …… 56
84. 感应加热时，零件截面上的温度是怎样分布的？ …… 58
85. 钢感应淬火温度应怎样选择？ …… 59
86. 感应淬火时，零件上的应力有哪些？怎样分布？ …… 59
87. 钢件感应淬火后的表面硬度为什么比普通淬火的高？ …… 60
88. 感应淬火常见加热方法有哪几种？如何选用？ …… 60
89. 有哪几类铸铁可以进行感应淬火？ …… 61
90. 铸铁感应淬火时应注意哪些方面？ …… 62
91. 感应淬火常用淬火冷却介质有哪些？应如何选用？ …… 63
92. 聚合物淬火冷却介质在感应淬火中应用效果如何？ …… 65
93. 淬火冷却介质的温度、压力、流量和添加剂含量对冷却能力有何影响？ …… 66
94. 感应淬火有哪些新的冷却方法？ …… 66
95. 感应淬火件的回火有哪几种方法？ …… 67
96. 感应热处理除用于表面淬火外，还有哪几方面的应用？ …… 69
97. 什么是钢的感应加热自冷淬火？ …… 70
98. 钢件在保护气氛中感应淬火有几种方法？有何实例？ …… 71
99. 感应退火的目的是什么？常用于哪些零件？ …… 72
100. 钢管焊缝为什么要进行退火？退火质量如何检验？ …… 72
101. 零件再结晶退火有否实例？ …… 73
102. 制订与执行感应热处理工艺过程卡应遵守哪些规定？ …… 73
103. 何时应进行感应热处理规范的修订？ …… 74
104. 感应热处理工艺检查包括哪些内容？ …… 74
105. 感应热处理工艺制订中常用的表格有哪些？ …… 75

第 4 章　感应淬火件的力学性能与结构设计 …… 77
106. 机械零件感应淬火的主要目的有哪些? …… 77
107. 感应淬火件的耐磨性如何? 与渗碳淬火件相比，哪种工艺的耐磨性好? …… 77
108. 感应淬火件的疲劳性能如何? 与调质、正火、渗碳相比，哪种工艺的性能好? …… 79
109. 感应淬火件的抗冲击性能如何? 与调质、正火、渗碳相比，哪种工艺的性能好? …… 80
110. 感应淬火件的淬硬层深度对零件扭转性能有何影响? …… 81
111. 淬火件的硬度应如何选用? …… 83
112. 感应淬火件的淬硬层深度，一般应如何选择? …… 84
113. 淬火件的淬硬区域应如何正确标注? …… 84
114. 感应淬火件的几何形状应如何适应淬火工艺? …… 85
115. 感应淬火件的技术要求能否与渗碳淬火件的技术要求等同? …… 86
116. 齿轮超速感应淬火后表面残留应力有多大? …… 87
117. 感应淬火件上的残留应力有哪些? 它是如何分布的? …… 87
118. 淬硬区部位及范围对弯曲疲劳性能有何影响? …… 89
119. 感应淬火件不回火对零件力学性能有何影响? …… 89
120. 哪些是应尽量避免的不良淬硬层分布 ? …… 90
第 5 章　感应热处理工艺调整与典型零件感应热处理工艺 …… 94
121. 感应热处理工艺调整包括哪些内容? …… 94
122. 如何调整高频及超音频电源设备的电规范? …… 94
123. 真空管式高频电源与负载不匹配时应如何处理? …… 95
124. 如何调整中频发电机的电规范? …… 96
125. 如何调整固态感应加热电源设备的电规范? …… 99
126. 如何在加热过程中保持较稳定的输出功率? …… 100
127. 如何调整感应淬火工艺规范? …… 102
128. 如何调整感应淬火后的回火工艺规范? …… 103
129. 工艺调试的试样是否必须与生产件尺寸完全一致? …… 104
130. 在什么情况下使用比 2 连接板或变压器多匝二次绕组? …… 105
131. 功率分配器有何功能? 常用在什么零件上? …… 106
132. 曲轴颈感应淬火有哪几种工艺方法? …… 106
133. 曲轴颈圆角感应淬火工艺是怎样的? . …… 106
134. 凸轮轴感应热处理工艺是怎样的? …… 108
135. 气缸套感应热处理工艺是怎样的? …… 110
136. 飞轮齿圈感应热处理工艺是怎样的? …… 110
137. 半轴感应热处理工艺是怎样的? …… 111
138. 等速万向节钟形壳感应热处理工艺是怎样的? …… 113
139. 齿轮感应淬火有哪些工艺方法? …… 115
140. 齿轮各类感应淬火工艺方法是怎样发展的? …… 117
141. 同步双频齿轮淬火工艺有什么特点? …… 119

142. 低淬透性钢齿轮感应淬火有什么特点？ …… 119
143. 齿轮沿齿沟单齿淬火工艺是怎样的？ …… 120
144. 小模数机床齿轮采用高频与超音频感应淬火，结果有什么不同？ …… 121
145. 转向齿条高频电阻加热淬火工艺是怎样的？ …… 121
第6章　感应淬火件的质量检验与控制 …… 122
146. 感应淬火件的质量检验一般包括哪些项目？ …… 122
147. 如何测量感应淬火件的淬硬层深度？ …… 123
148. 钢件感应淬火后如何进行金相检验？ …… 123
149. 珠光体球墨铸铁件感应淬火后如何进行金相检验？ …… 123
150. 机床灰铸铁导轨感应淬火后如何进行金相检验？ …… 124
151. 钢铁件的感应淬火质量控制对设备有什么要求？ …… 124
152. 钢铁件的感应淬火回火过程质量控制有哪些内容？ …… 125
153. 感应淬火件淬硬层深度波动的影响因素有哪些？ …… 126
154. 如何解决感应淬火件的变形问题？ …… 126
155. 感应淬火件硬度达不到技术要求的原因有哪些？ …… 127
156. 哪些工艺不当会造成感应淬火件产生裂纹？解决措施是什么？ …… 128
157. 哪些材料因素会使感应淬火件产生裂纹？解决措施是什么？ …… 128
158. 造成感应淬火件产生裂纹的不合理结构设计有哪些？ …… 129
159. 如何解决感应淬火件出现磨削裂纹的问题？ …… 129
160. 如何解决感应淬火件的局部烧熔问题？ …… 129
161. 什么是硬化层剥落？如何解决？ …… 130
162. 什么是硬化层崩落？ …… 130
163. 什么是硬化层边棱开裂、掉圈？如何解决？ …… 130
164. 我国与感应热处理相关的现行标准有哪些？ …… 130
第7章　感应器的设计与制造 …… 132
165. 感应器的设计与制造应达到哪些要求？ …… 132
166. 感应器设计时，如何应用相关理论与法则？ …… 132
167. 感应器设计时，基本结构尺寸应如何确定？ …… 133
168. 感应器设计的基本原理有哪些？ …… 135
169. 感应器的耦合效率哪种形式较高？ …… 137
170. 高频感应器设计典型结构有哪些？ …… 137
171. 中频感应器设计时，基本结构、尺寸如何确定？ …… 140
172. 感应器的水冷及喷水装置如何设计？ …… 141
173. 感应器上的附加装置有哪些？ …… 142
174. 中频感应器在什么情况下需附加导磁体？其导磁体如何设计？ …… 142
175. 多孔或多加热区的感应器应如何设计？ …… 143
176. 什么是直接接到中频电源上的多匝感应器？ …… 143
177. 导电板结构与感应器效率有很大关系吗？ …… 144

178. 喷液器应如何设计？ …… 144
179. 喷液器的典型结构有哪些？ …… 146
180. 感应器有效圈冷却水流量应如何计算？ …… 147
181. 感应器（或喷液器）当增高压力时，它的流量如何变化？ …… 148
182. 什么是无触点开合感应器？ …… 148
183. 双孔或多孔感应器设计时应注意什么？ …… 149
184. 什么是磁通截留器？其主要功能是什么？ …… 150
185. 什么是集流器？其主要功能是什么？ …… 150
186. 集流器的典型结构有哪些？ …… 151
187. 内孔加热感应器有何特点？ …… 153
188. 内孔淬火感应器有几种类型？ …… 153
189. 缸套内表面淬火感应器有何特点？ …… 154
190. 长内孔淬火感应器设计的特点有哪些？ …… 154
191. 超高频电源可否用于小内孔淬火？ …… 155
192. 两个凸轮靠得很近时，应如何设计感应器？ …… 155
193. 同时进行双滚道淬火的感应器有何长处？ …… 156
194. 快换感应器夹头的典型结构有哪些？ …… 157
195. 加热兼喷液的有效圈与通有冷却水只能加热的有效圈各有什么优缺点？ …… 158
196. 如何选用单匝与多匝感应器？ …… 159
197. 多匝感应器比单匝感应器优越的实例有哪些？ …… 159
198. 工件采用扫描淬火感应器或一次加热感应器，其能耗对比有否实例？ …… 160
199. 感应器有效圈上喷陶瓷涂层有何效果？ …… 160
200. 导磁体的作用是什么？ …… 160
201. 多匝感应线圈两端镶装导磁体有何效果？ …… 161
202. 导磁体是否可用作屏蔽？ …… 161
203. 导磁体反装有什么作用？ …… 161
204. 导磁体有多少品种？ …… 161
205. 硅钢片作导磁体时，其厚度应如何选用？ …… 163
206. 如何选用导磁体？ …… 164
207. 如何用简单的方法比较导磁体的质量？ …… 164
208. 可加工导磁体加工时应注意什么？ …… 165
209. 导磁体安装使用时应注意什么？ …… 165
210. 导磁体胶应如何选用？ …… 165
211. 何谓泥糊状导磁体？如何将其固定到有效圈上？ …… 166
212. 导磁体必须磷化吗？如何防止导磁体腐蚀？ …… 167
213. 导磁体失效现象与原因有哪些？ …… 167
214. 什么是树脂浇注体感应器？ …… 167
215. 什么是耐火水泥浇注体感应器？ …… 168
216. 屏蔽器的材料与厚度应如何确定？ …… 168

217. 什么是感热体？如何应用？ …… 168
218. 如何制造既保证有效圈定位精度又经济的感应器？ …… 169
219. 制造感应器的工夹具有哪些？感应器的检验工具与夹具有哪些？ …… 169
220. 感应器矩形管的成形方法有哪几种？ …… 170
221. 感应器的水流量测试有哪些方法？ …… 170
222. 感应器的绝缘测试有什么作用？ …… 171
223. 感应器负载测试有什么作用？ …… 171
224. 感应器的密封试验有哪些方法？ …… 171
225. 感应器合理使用与维护的要点有哪些？ …… 171
226. 如何提高导磁体的使用寿命？ …… 172
227. 感应器失效的形式有哪些？ …… 172
228. 如何提高感应器的使用寿命？ …… 173
229. 感应器使用寿命如何计算？ …… 174
230. 如何提高感应器效率？ …… 174
231. 感应器的电感与哪些因素有关？ …… 175
232. 感应器有效圈载流密度的上限是多少？ …… 175
233. 感应器常用金属材料有哪些？应如何选用？ …… 175
234. 感应器常用绝缘材料有哪些？应如何选用？ …… 176
235. 感应器钎焊用的焊料与焊剂有哪些？如何选用？ …… 177
236. 感应器零件用钎焊连接时应注意什么？ …… 178
237. 感应器用的标准件（外购）有哪些品种和规格？ …… 178
238. 用实心铜块加工制作感应器有什么优缺点？ …… 178
239. 怎样保证感应器的质量与产品的一致性？ …… 179
240. 外圆与内孔同时加热的感应器是什么样的？ …… 180
241. 感应器用柔性电缆是什么样的？ …… 180
242. 钢丝螺套在感应器上是怎样应用的？ …… 180
第 8 章　感应淬火机床的结构与性能 …… 182
243. 感应淬机床有哪几种类型？其主要技术参数有哪些？ …… 182
244. 淬火机床的主要组成部分有哪些？ …… 183
245. 淬火机床中常用的机械、电气部件有哪些？ …… 185
246. 淬火机床常用的数控系统有哪些？ …… 187
247. 通用淬火机床的传动方式一般有几种？哪种比较稳定？ …… 187
248. 淬火工件扫描淬火时，应如何选取工件移动或变压器感应器组移动方式？ …… 187
249. 淬火机床主顶尖的转速应如何选取？ …… 188
250. 工进速度、快进与快退速度应如何选择？ …… 189
251. 通用淬火机床一般有哪些功能？如何确定？ …… 189
252. 什么是紧凑结构感应淬火装置？有何特点？ …… 190
253. 什么是拾取式淬火机床？ …… 191

254. 什么是双输出电源淬火装置？ …… 192
255. 钟形壳全自动淬火机床是怎样的？ …… 193
256. 什么是族类零件感应淬火机床？ …… 194
257. 国产通用淬火机床有哪些典型品种与规格？ …… 195
258. 专用感应淬火装置有哪些特点？ …… 196
259. 专用感应淬火装置有哪些典型品种与规格？ …… 196
260. 曲轴感应淬火机床是如何发展的？ …… 199
261. 半自动曲轴浸液淬火机床是怎样工作的？ …… 199
262. 自动更换感应器的半自动曲轴淬火机床是怎样工作的？ …… 201
263. AKWH 全自动曲轴淬火机床是怎样工作的？ …… 201
264. 全自动柔性曲轴淬火机床是怎样工作的？ …… 202
265. 静止加热曲轴颈淬火装置有什么优点？ …… 203
266. 立式凸轮轴淬火机床一般有哪两种结构？ …… 204
267. 一次加热凸轮轴所有淬火表面的淬火机床是怎样的？ …… 205
268. 双工位气缸套淬火机床是怎样工作的？ …… 205
269. 三工位工频气缸套回火机床是怎样工作的？ …… 206
270. 全自动半轴淬火机床是怎样工作的？ …… 207
271. 卧式履带销自动淬火机床是怎样工作的？ …… 208
272. 链轨节一次加热淬火机床是怎样工作的？ …… 209
273. 链轨节扫描加热淬火机床是怎样工作的？ …… 210
274. 驱动轮淬火机床是怎样工作的？ …… 211
275. 导向轮淬火机床是怎样工作的？ …… 212
276. 什么是埋液淬火机床？ …… 212
277. 气门端头淬火装置是怎样的？ …… 213
278. 双工位驱动轴淬火机床是怎样工作的？ …… 213
279. 盘形薄件淬火机床是怎样工作的？ …… 215
280. 螺钉头全自动感应淬火机床是如何工作的？ …… 215
281. 滚珠丝杠淬火机床有哪些特点？ …… 216
282. 锭杆感应淬火机床是怎样工作的？ …… 217
283. 冷轧辊双频感应淬火机床是怎样工作的？ …… 217
284. 大直径冠齿轮一次加热淬火机床是怎样工作的？ …… 218
285. PC 钢筋热处理生产线是怎样工作的？ …… 219
286. 国产钢筋、钢丝热处理生产线发展情况如何？ …… 219
287. 等速万向节钟形壳感应热处理生产线是怎样工作的？ …… 220
288. 双频齿轮感应淬火生产线是怎样工作的？ …… 221
289. 大回转支承滚道淬火机床的结构是什么样的？ …… 223
290. 什么是在线净功率监控器？ …… 224
291. 什么是无触点感应器自动定位控制？ …… 224
292. 什么是功率切换器？ …… 225

293. 什么是接地故障断流器？ …… 226
294. 什么是能量监控器？ …… 226
295. 什么是功率分配器？ …… 227
296. 流量监控用在哪些方面？常用哪些流量计？ …… 227
297. 淬火机床上哪些阀件与管件是必要的？其功能如何？ …… 228
298. 感应加热装置对冷却水的哪些项目指标有要求？ …… 230
299. 感应加热装置对冷却水质的具体要求有哪些？ …… 230
300. 设计感应加热装置冷却系统及管路时应注意哪几方面？ …… 232
301. 设计淬火冷却介质管路时应注意哪些方面？ …… 233
302. 感应加热装置使用的测温仪器有哪些？ …… 234
303. 感应加热装置在什么工作条件下使用机器人或机械手？ …… 235
参考文献 …… 236

第1章　感应加热物理基础

1. 什么是电磁感应现象？

金属能够在感应器内加热，主要依靠电磁感应现象。电磁感应能够将电能经由真空、空气或其他介质所形成的空间传送到所需加热的金属上去。

电磁感应的实质是：交变的磁场能够引起交变的电场。反过来说，交变的电场能引起交变的磁场，如图1-1所示。

当一匝或数匝线圈内通过交变电流时，线圈周围便产生交变磁场，置于交变磁场中的导体（金属零件）便产生电动势E（V），即

$$E = 4.44fn\phi \times 10^{-8} \quad (1\text{-}1)$$

式中　f——电流频率（Hz）；

ϕ——磁通的振幅；

n——回路的匝数。

当加热金属零件时，回路即是零件本身，此时，$n=1$。

导体在电动势的作用下产生涡流，其值可用下式表示：

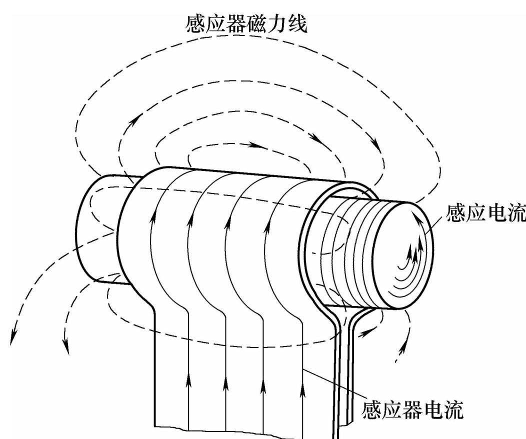


图1-1　螺管状感应器与圆柱形工件

$$I = \frac{E}{Z} \quad (1\text{-}2)$$

式中　I——涡流（A）；

E——电动势（V）；

Z——金属导体的阻抗。

这个涡流就使金属本身发热，使金属自身进行加热。根据焦耳-楞次定律，涡流产生的热量Q（J）可由下式计算：

$$Q = I^2Rt \quad (1\text{-}3)$$

式中　I——涡流（A）；

R——金属零件电阻（Ω）；

t——加热时间（s）。

当加热的金属零件为铁磁材料时，交变磁场使铁磁材料反复磁化，磁畴不断转向，并产生摩擦，消耗能量，称为磁滞损耗。磁滞损耗也使金属零件发热，但这部分热量比涡流的热量小得多。

2. 什么是趋肤效应？

趋肤效应也称集肤效应或表面现象。当直流电通过一导体时，导体截面上各点的电流密度是均匀的。当交流电通过导体时，导体表面处的电流密度较大，导体内部的电流密度较小。当高频率电流通过导体时，导体截面上的电流密度差更加增大，电流主要集中在导体表面，这种现象称为趋肤效应。趋肤效应作用下从表面到心部的相对电流密度如图 1-2 所示。

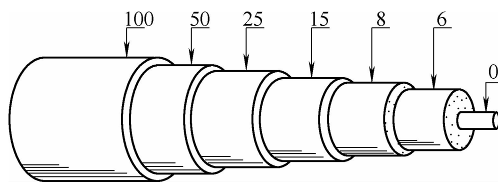


图 1-2　趋肤效应作用下从表面到心部的相对电流密度

趋肤效应可以用楞次定律来解释：当通过零件的磁通发生变化时，产生在零件内的感应电动势，总企图使感应电流产生的磁通反抗原有磁通的变化。

设想零件是一个由无数同心层组成的钢棒，当它处在感应器内的磁场中，如图 1-3 所示，因为邻近磁场，涡流将首先在外层产生，而且钢棒外层的涡流最强。按照楞次定律，此外层感应电流的流动，将产生磁通，但其方向将阻止感应器磁通的增加。这个对抗减小了作用在第二层的感应器的磁通量，因此减少了感应电流，即第二层电流比第一层电流为小。第二层电流产生的磁通对抗感应器产生的磁通，使作用于第三层的磁通量更小。在这种情况下，感应器磁通量与感应电流呈现出向钢棒中心逐步减弱的现象。

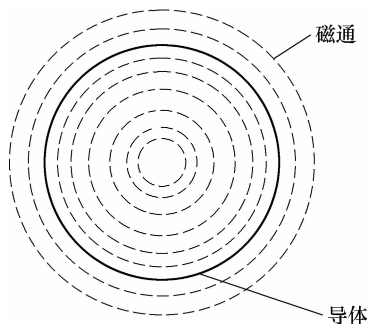


图 1-3　处在磁场中的钢棒

3. 什么是邻近效应？

导体内交变电流的分布受到邻近导体内交变电流的影响，这种现象叫做邻近效应。

图 1-4a 表示两个平行导体 A 和 B，A 中的导体丝 a_1 所交链导体 B 的磁通量比导体丝 a_2 所交链的为少，故在 a_1 中的互感电动势就比 a_2 中的为小。当导体 A、B 带有同方向电流时，a_1 和 a_2 的互感电动势与电流的方向基本相反，使 a_1 的电流密度比 a_2 的为大。当导体 A、B 带有反方向的电流时，因感应电动势与电流有基本一致的方向，a_2 的电流密度比 a_1 处为大。

邻近效应在实际应用中，基本上有以下两种情况：

1）当两个平行导体通入方向相反、大小相等的电流时，电流集中到导体互相靠近的侧面，见图 1-4b。

2）当两个平行导体通入方向相同、大小相等的电流时，电流集中到导体相距最远的外侧，见图 1-4c。

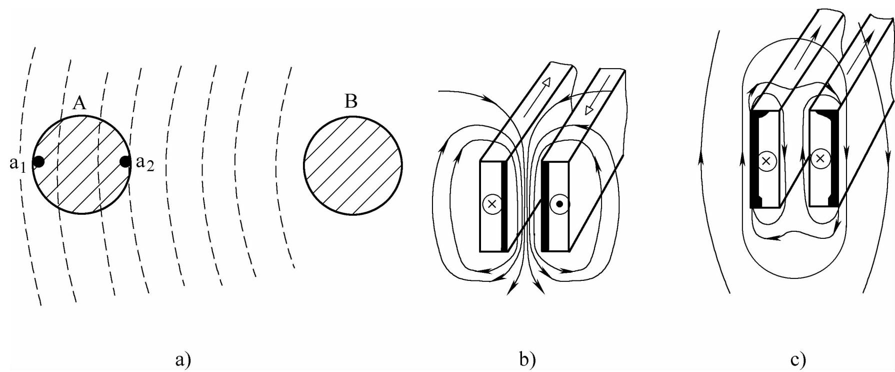


图 1-4　邻近效应时导体内电流的分布

a）导体丝 a_1 比 a_2 交链磁通量为少　b）平行导体通入方向相反、大小相等电流时　c）平行导体通入方向相同、大小相等电流时

4. 什么是环状效应？

高频电流流过环状导体时，最大电流密度分布在环状导体内侧，这种现象称为环状效应，如图 1-5 所示。环状效应的实质也就是环形感应器的邻近效应。

环状效应使感应器上的电流密集到感应器内侧，对加热零件外表面十分有利，但对加热零件内孔时，此效应使感应器电流远离加热零件表面，对加热是不利的，见图 1-6。

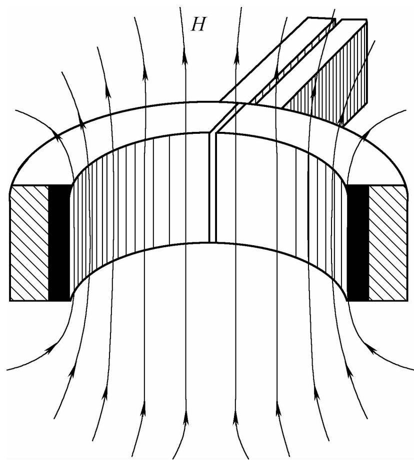


图 1-5　环状效应

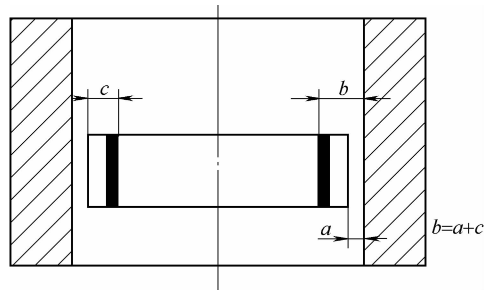


图 1-6　内孔加热时环状效应使电流远离加热表面

5. 什么是有磁路存在时的趋肤效应？

感应器的有效圈上装了 ⊓ 形导磁体，就能使高频电流从导磁体开口一边的导体表面流过，如图 1-7 所示。这就是有磁路存在时的趋肤效应，也称为导磁体的驱

流作用。

导磁体是具有良好磁导率、磁阻很小的磁性材料。导体装上⊓形导磁体后，当高频电流通过导体时，将有交变磁场产生，磁力线将主要从导磁体中通过，其分布如图 1-8 所示。假设将导体截面分成 n 层，则在 1 层处包围的磁力线最少，磁通密度最小，而在 n 层处包围的磁力线最多，磁通密度最大，因而自感电势最大，电流被驱向感抗小的 1 层，即高频电流从导磁体开口一边的导体表面流过。

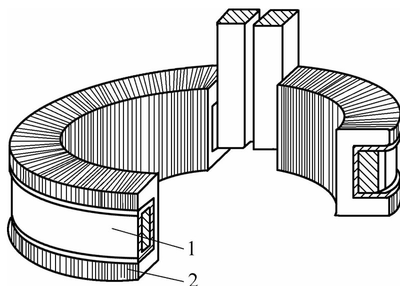


图 1-7　感应器有效圈上装上了导磁体
1—有效圈　2—导磁体

图 1-9 所示为高频感应器（$f=200\text{kHz}$）有效圈装上导磁体后的电流分布。

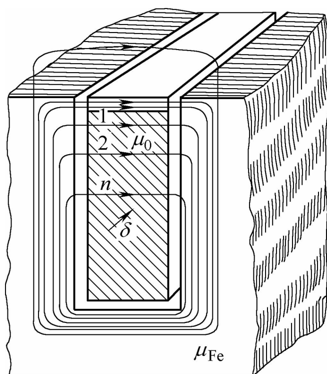
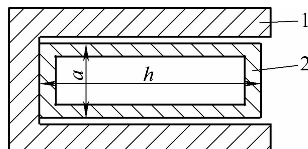


图 1-8　有效圈装上了导磁体后，导体上电流的分布



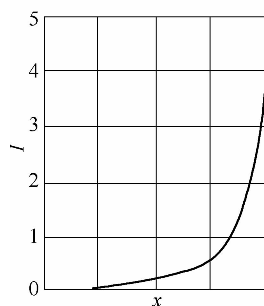


图 1-9　高频感应器有效圈装上导磁体后的电流分布
1—导磁体　2—有效圈
注：$h=7\text{mm}$，$a=5\text{mm}$。

6. 什么是工频、高频、中频、超音频、超高频电流？

1）工频电流也称线频电流，其频率为市电频率，即 50～60Hz。

2）高频电流是泛指比常用频率（50～60Hz）高的一切电流的频率。由于中频、超音频电流名词的出现，现在高频电流主要指 100～6000kHz 的电流频率。

3）中频电流一般指 500～10000Hz 电流频率。

4）超音频电流一般指大于 20kHz，小于 100kHz 的电流频率。

5）超高频电流指比一般高频电流更高的兆赫级电流，如 12MHz。

7. 什么是电流透入深度？

由于趋肤效应，导体或零件上的电流分布是不均匀的。工程上规定，从表面电流最大值处（I_0）测到$\frac{1}{e}I_0$处的深度为电流透入深度 d($e = 2.718$)，如图 1-10 所示。

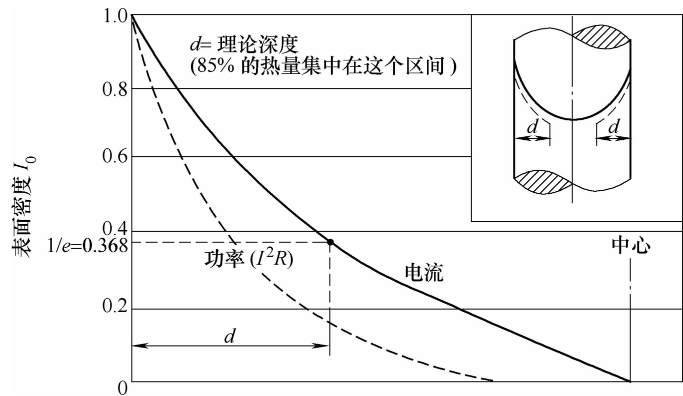


图 1-10　工件截面上相对电流密度和相对功率密度分布

电流在 d 薄层内产生的热量为全部电流产生热量的 85%。

电流透入深度 d（mm）可按下式计算：

$$d = 50300\sqrt{\frac{\rho}{\mu f}} \tag{1-4}$$

式中　f——电流频率（Hz）；

μ——材料的相对磁导率；

ρ——材料的电阻率（Ω · cm）。

从上式可知，电流透入深度与 ρ、μ、f 三值有关。f 越高，d 越小，所以电流频率越高，电流透入深度越小。对于铁磁性材料，在加热过程中，随着温度升高，ρ 值与 μ 值又会发生很大变化，ρ 值随温度升高而升高，μ 值随温度升高到 770℃ 居里点时，急剧降低到 1，电流透入深度大大增加，如图 1-11 所示。

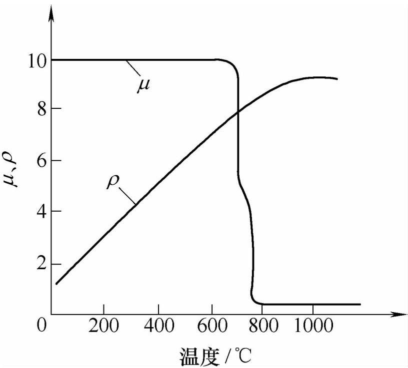


图 1-11　钢在加热过程中 ρ 与 μ 的变化

钢在居里点以下的电流透入深度称为冷透入深度 $d_{冷}$，在居里点以上的电流透入深度称为热透入深度 $d_{热}$，这两个透入深度（mm）可用下列简化公式计算：

$$d_{冷} = \frac{20}{\sqrt{f}} \tag{1-5}$$

$$d_{热} = \frac{500}{\sqrt{f}} \tag{1-6}$$

对于感应器上电流透入深度 $d_{铜}$(mm)，由于 ρ、μ 两值基本不变，可用下式计算：

$$d_{铜} = \frac{67}{\sqrt{f}} \tag{1-7}$$

表 1-1 列举了纯铜和钢在不同电流频率和温度时的电流透入深度。

表 1-1　不同频率下铜和钢的电流透入深度

频率/Hz	电流透入深度/mm		
	铜(15℃，$\rho=2\times10^{-6}\Omega\cdot cm$，$\mu=1$)	钢(15℃，$\rho=20\times10^{-8}\Omega\cdot cm$，$\mu=10\sim40$)	钢(800℃，$\rho=120\times10^{-6}\Omega\cdot cm$，$\mu=1$)
50	10.0	10.0～5.0	70.8
500	3.0	3.0～1.5	22.0
1000	2.2	1.9～0.95	15.5
2500	1.3	1.5～0.7	10.0
4000	1.0	1.1～0.55	7.0
8000	0.75	0.75～0.38	5.6
10000	0.7	0.7～0.35	5.0
50000	0.3	0.30～0.15	2.2
70000	0.27	0.226～0.113	1.9
250000	0.13	0.15～0.07	1.0
450000	0.1	0.09～0.045	0.75

8. 电流透入深度由浅入深是如何变化的？

钢件感应加热时，开始升温很快，在过了磁性转变点后，加热速度降低。这是因为钢件开始加热时是冷态，涡流深度很浅，这第一层在一定功率下很快升温，第一层过了磁性转变点后，电阻增大，涡流进入第二层（冷态深度），同样情况随后进入第三层……第 n 层，直到电流透入深度为止，涡流不再往心部进入，而热靠传导往心部扩散。这就是感应加热涡流渗入的全过程。加热过程中，由于涡流深度增加，功率密度必然下降，因此加热速度明显减缓。在固定频率下，利用不同功率密度得到不同的淬硬深度，其原因也就在此。

9. 电流透入深度是否就是淬硬层深度？

电流透入深度是指从电流密度最大的表面测到电流值为表面电流值的 $1/e$ 处的距离。

淬硬层深度是指从淬火表面测到 50%（体积分数）马氏体（或硬度要求值下限 ×0.8）处这一段距离。

这是两个根本不同的概念，决不能混淆。电流透入深度的大小取决于f、ρ、μ三者，而淬硬层深度却取决于加热层深度、淬火温度、冷却速度与材料本身淬透性等因素。低淬透性钢尽管加热层很深、冷却很激烈，但是淬硬层深度却很浅，就是一个特殊的例子。

图1-12所示为45钢淬硬层内的组织、硬度与温度变化关系。

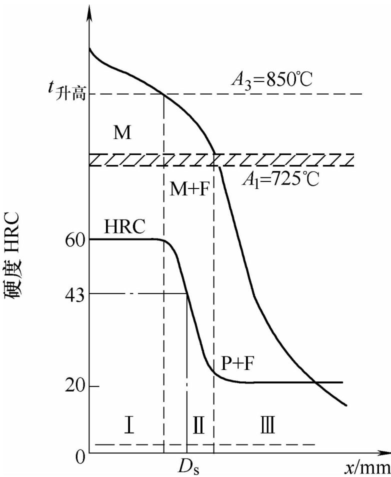


图1-12 45钢淬硬层内组织、硬度与温度变化关系

t—温度分布曲线 D_s—淬硬层深度 HRC—硬度分布曲线 区Ⅰ—加热温度高于A_3，淬火后得马氏体 区Ⅱ—加热温度在A_1与A_3之间，淬火后得马氏体与铁素体 区Ⅲ—未转变，保持珠光体与铁素体

10. 什么是透入式加热？什么是传导式加热？哪种加热类型较好？

透入式加热也称为热容量加热，即当零件加热时，电流热透入深度大于淬硬层深度，可用下式表示：$d_{热} > D_s$。

透入式加热时，淬硬层的热能由涡流产生，整个层中的温度基本上是均匀的。透入式加热的实例最多，汽车、拖拉机零件大量生产时，绝大多数选用了透入式加热。例如，当电流频率为8kHz时，电流热透入深度约为6mm（850℃）。凡是淬硬层深度小于6mm的，均属透入式加热。

传导式加热也称为表层加热，即当零件加热时，电流热透入深度小于淬硬层深度，可用下式表示：$d_{热} < D_s$。

传导式加热时，热能只产生在$d_{热}$这一层，超过$d_{热}$后的金属，其温度的提高完全依靠热传导。为了使D_s深度这一层达到淬火温度，加热速度不能大，否则表面会产生过热。

传导式加热的实例也很多，由于电源设备限制，在高频设备上处理层深大于1mm的零件，均属传导式加热。高频设备$f \approx 250$kHz，$d_{热} = 1$mm。

图1-13表示达到同样淬硬层深度时，透入式加热和传导式加热零件截面上的温度分布曲线。

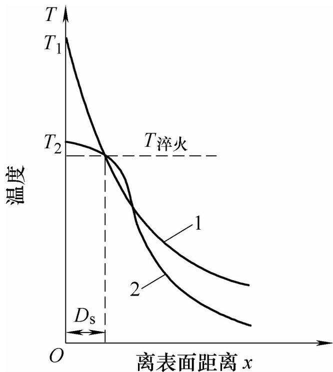


图1-13 透入式加热和传导式加热零件截面上的温度分布

1—传导式加热 2—透入式加热

表1-2列举了两种感应加热类型的主要特性，从表中可以得出结论，在大量生产条件下

应选择透入式加热。

表 1-2 两种感应加热的特性

特　　性	感应加热的类型	
	传导式加热	透入式加热
零件热能的产生	在表面	在淬硬层内为主
温度分布	按热传导定律	陡，接近直角
表面过热度	快速加热时较大	小（快速加热时亦小）
零件非淬火部分受热	较大	小
加热时间	较长（按分计），特别在要求深度大、过热度小时	较短（按秒计），在要求深度大，过热度小时也相同
生产率	低	高
零件加热热效率 η	低，当表面过热度 $\Delta t=100℃$ 时，$\eta=13\%$	高，当表面过热度 $\Delta t=100℃$ 时，$\eta>30\%$

11. 透入式加热对节能、提高经济效益有何意义？

透入式加热在节能上的意义是巨大的，从表 1-3 与表 1-4 对比数据可以得出以下两点结论：

1）透入式加热电能消耗少，淬火成本低。

2）传导式加热时，随着淬硬层深度的增加，热的有效利用率更加降低，淬火成本更趋增高；透入式加热时，加热时间短，生产率高。

表 1-3 ϕ52mm 圆柱零件在 2kHz 频率下淬火（$\Delta t=100℃$，45 钢）

淬硬层深度 /mm	加热时间 /s	淬火零件上的功率密度 /（kW/cm^2）	网路功率密度 /（kW/cm^2）	网路电能密度 /（$W\cdot h/cm^2$）
1.5	2	1.4	3.2	1.75
2	2.5	1.35	3.1	2.1
3	3.4	1.2	2.7	2.6
4	4.3	1.05	2.4	2.8
5	5.1	0.95	2.1	3.0
6	6.3	0.8	1.8	3.2
7	8	0.7	1.6	3.5

表 1-4　ϕ52mm 圆柱零件在高频 300kHz 下淬火（$\Delta t=100$℃，45 钢）

淬硬层深度 /mm	加热时间 /s	淬火零件上的功率密度 /（kW/cm²）	网路功率密度 /（kW/cm²）	网路电能密度 /（W·h/cm²）
1	2.5	0.9	2.7	1.9
2	9	0.5	1.5	3.8
3	15	0.4	1.2	5.0
4	22	0.3	0.9	5.5
5	28	0.25	0.75	5.8
6	36	0.2	0.6	6.0
8	50	0.15	0.45	6.3

12. 什么是磁场？

磁场是物理场的一种，它分布在场源周围的空间，并随场源的变化而及时变化。电流和永久磁铁都是磁场源。图 1-14 所示为直导线及变成单匝时所形成的磁场。

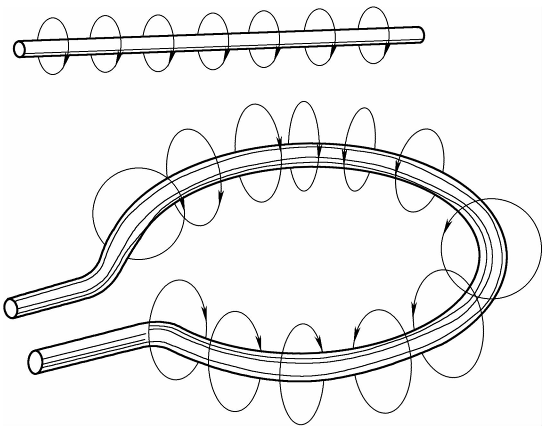


图 1-14　直导线及变成单匝时所形成的磁场

13. 磁力线的作用是什么？

磁力线有助于观察磁场的分布，磁力线密度大的地方表明磁场强度较强。磁力线围绕场源总是闭合的，这好比在闭合的环形水管中流动的水流一样。

14. 什么是磁导率？

在感应加热技术中，磁导率是个极重要的术语。如果用一个通电的螺线圈去吸引铁块，线圈吸力不大；如果线圈中插入铜棒，吸力还是不大；如果线圈中插入铁棒，吸力会大大增加；如果再增加线圈的匝数或电流，吸力还会增大。这说明螺线圈的磁性强弱，即磁感应强度的大小不但与线圈电流、匝数有关，而且与磁场中的介质有密切关系。为了说明介质的磁性，引入了磁导率这个物理量。

磁导率是表征介质磁化性质的物理量，用字母 μ 来表示，不同的介质材料，磁导率不同。磁导率的单位是 H/m。真空中的磁导率 $\mu_0=4\pi\times10^{-7}$H/m。

感应加热常用的是相对磁导率，用 μ_r 表示。它是任一介质的磁导率与真空中磁导率的比值，即 $\mu_r=\mu/\mu_0$。对于所有的非磁性物质，μ_r 为 1，而铁磁物质的 μ_r 可达数万，此值还受磁场强度的影响，如最常用的硅钢片 $\mu_r=7500$，而坡莫合金的 μ_r 则高达几万到十万以上。

15. 什么是磁场强度？

磁场强度等于磁场中某点的磁感应强度 B 与介质磁导率 μ 的比值，磁场强度用 H 来表示，其计算式为 $H=B/\mu$。磁场强度的单位为 A/m。

磁场强度是一个矢量，它是对磁势强度的度量，好似水流某处的压力梯度。

16. 什么是磁感应强度？

磁感应强度是定量描述磁场中各点强弱和方向的物理量。试验证明，通电导体在磁场中受力的大小与导体的有效长度、电流大小及磁场的强弱有关。

载流导体在磁场中所受的力 F 与导体中的电流 I 和它垂直于磁力线的长度 l 的乘积的比值来表示该点磁场的性质，并称为该点的磁感应强度 B，其计算式为 $B=F/(Il)$。磁感应强度的单位是 T。

磁感应强度是一个矢量，它的方向是该点小磁针 N 极所指的方向。磁场中某固定点，磁感应强度的大小和方向都是一定的，即 B 为定值；对不同的点，B 的大小和方向可以完全不同。因此，B 能描述该磁场各点的性质，它可比喻为流动液体某一点上的速度向量。

17. 什么是磁通？

表示磁场在空间分布情况的物理量称为磁通，用字母 Φ 表示。磁通的定义是：磁感应强度 B 和与它垂直方向某一截面积 S 的乘积。在均匀磁场中，因 B 为常数，则磁通 $\Phi=BS$。磁通的单位是 Wb。

18. 什么是磁阻？

磁阻好比电路中的电阻。电路中电压（电势）产生的电流流过电阻；在磁路中，线圈的安匝数（磁势）产生的磁通“流过”磁路的磁阻。在产生相同磁通情况下，磁路中放入铁磁物质时所需的电流小，没有铁磁物质时所需的电流大，或者说，在线圈中通入相同电流时，前者产生的磁通量大，而后者小。

19. 什么是磁能？

磁能是一种与磁场相联的能量，它存在于载流导体周围的空间，载流导体是磁场源。对于交变电流来说，磁能不断地转换为线圈电路中的电能，然后电能又转换为磁能。在能量相互转换的每个周期里，导体会吸收一部分能量。磁能的单位是 J，在工业应用中更为常用的单位是 kW · h，$1\text{kW} \cdot \text{h}=36\times10^5\text{J}$。

20. 什么是横向磁场加热？它的感应器是什么样的？

横向磁场加热亦称为横向磁力线（Transverse flux）加热，其特点是磁通与工件的主轴线相垂直。横向磁场加热感应器见图 1-15。

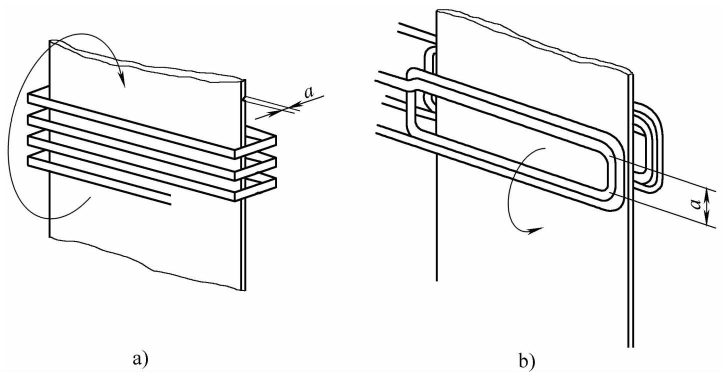


图 1-15　横向磁场加热感应器

a）纵向磁场磁力线与薄板平行　b）横向磁场磁力线与薄板垂直

21. 什么是纵向磁场加热？它的感应器是什么样的？

纵向磁场加热亦称为纵向磁力线（Iongitudinal flux）加热，其特点是磁通与工件的主轴线一致或重合。纵向磁场加热感应器见图 1-16，这是生产中使用得最多的纵向磁场加热感应器。

22. 什么是闭合磁路加热感应器？

一台变压器铁心上套上一次绕组和环形工件（二次绕组），当一次绕组通过 I_1 电流时，二次绕组（工件上即会产生 I_2 电流）将工件加热。此种感应器常应用于飞轮齿圈、轴承的热装，也可用作气缸套工频回火感应器。图 1-17 所示为闭合磁路加热感应器。

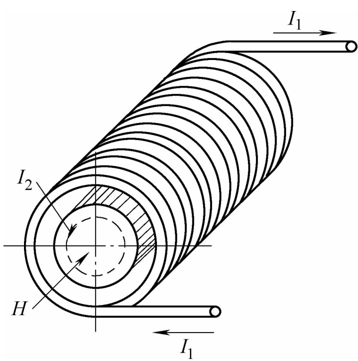


图 1-16　纵向磁场加热感应器

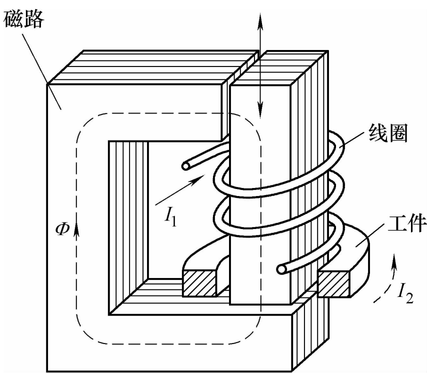


图 1-17　闭合磁路加热感应器

23. 什么是开启式磁路加热感应器?

开启式磁路的特点是工件放置在磁路的开口中，磁力线垂直于工件轴线。此种感应器可用于加热钢板边缘段，也可用于锯片齿部加热。图 1-18 所示为开启式磁路加热感应器。

24. 什么是纵向回线加热感应器?

纵向回线加热感应器见图 1-19。其特征是矩形管与工件轴线平行，加热工件必须旋转，才能使圆周表面全部加热到。生产中，此种感应器常应用于半轴一次加热。纵向回线加热也称为一发法加热（Single Shot Heating）。

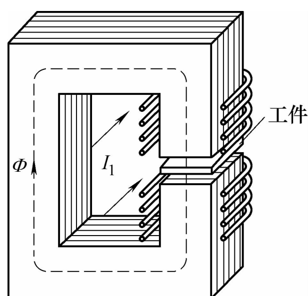


图 1-18　开启式磁路加热感应器

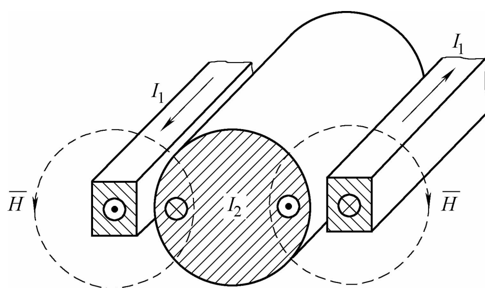


图 1-19　纵向回线加热感应器

25. 什么是软磁材料?

软磁材料是磁滞回线很窄的铁磁材料，如硅钢片、坡莫合金、铁氧体等，其特点是磁导率 μ 很大，剩磁和矫顽力都很小，容易磁化也容易去磁，因而磁滞损耗很小。

硅钢片的性能详见第 7 章相应部分。坡莫合金（主要是铁镍合金）不但矫顽力很小，而且磁导率 μ 很高，起始相对磁导率可达数十万。铁氧体和磁介质材料用在高频电路中，其损耗比金属磁性材料低得多，而且具有高的电阻。

26. 铁磁材料有哪些特性?

铁磁材料有以下特性：

1）能被磁铁吸引。

2）能被磁化，在反复磁化过程中，有剩磁和磁滞损耗。

3）磁导率不是常数，但每一种铁磁材料都有一个最大磁导率。

4）对各种材料的磁感应强度 B 都有一个饱和值。

27. 什么是电容量?

一定电压下电容器储存电荷能力大小的物理量称为电容量，简称电容，以 C（单位为 F）表示，其大小等于电容器任一板极所储存的电量 Q 与两极板间的电压 U 之比，即 $C=Q/U$。

28. 什么是涡流损耗?

由于磁场的耦合作用，当交变的磁力线穿过导体的横截面时，导体中会产生涡流。导体中一定要有闭合的导电回路才会产生涡流，导体才会发热。试想将一个细的开口金属环置入交变的磁场中，即使开口两端有电压它也不会发热。必须指出，对于一台有固定外形尺寸和频率的感应加热装置来说，磁滞损耗与涡流损耗的关系是一定的，但无法分离磁滞发热与涡流发热，前者只占总损耗的少部分，后者则占主要部分。涡流损耗产生的热量可按 $Q = I^2Rt$ 计算。

29. 什么是磁滞损耗?

铁磁物质内部的磁分子在交变磁场作用下，不断地来回改变方向而在内部产生摩擦所引起的损耗称为磁滞损耗。感应加热过程中，频率低时的磁滞损耗不超过 10%，随频率的增加由于摩擦加剧而损耗也增加。对于非磁性材料（顺磁和逆磁物质）磁滞损耗值为零。

30. 什么是无功功率?

无功功率是指在感应加热装置中，由感应器和电容器组组成的振荡槽路内，进行电能与磁能交换时电磁功率的大小。这表明由电源供给的功率中有一部分要由振荡槽路返回到电源。无功功率的单位为 kvar，其值等于视在功率与有功功率的平方差再开方。

31. 什么是功率因数（$\cos\phi$）?

功率因数是有功功率与视在功率之比（kW/kV · A），其值表示在电磁振荡的一个周期里被吸收的有功功率占视在功率的多少。

32. 什么是视在功率?

视在功率是电路中电压与电流的乘积，单位是 kV · A。例如，一台变压器的原边电压为 800V，电流为 500A，则视在功率等于 400kV · A。在直流电路中，视在功率等于有功功率，此时“视在”是没有意义的。在交流电路中，特别是在感应加热设备的槽路回路中，当电能与磁能不断地交换时，只有一部分能量被工件吸收，这好比在 50Hz 交流的电动机电路中，只有一部分能量被吸收一样。

33. 什么是有功功率?

有功功率表示单位时间（1s）内吸收功率的大小。有功功率总是小于（最多等于）视在功率。例如，感应器两端电压为 50V，流过电流为 4000A，则视在功率是 200kV · A，工件及感应器吸收的有功功率为 30kW（功率因数为 0.15），或者是 80kW（功率因数为 0.4）。它是消耗在感应器及工件上用于实际加热的功率。

34. 什么是磁屏蔽?

对靠近感应器不希望加热的金属部分，为阻止磁力线而使用的阻挡物，一般称为磁屏蔽（Magnetic Shield），如凸轮感应器上镶嵌导磁体，它阻止磁力线散逸到邻近的凸轮或轴颈部分，而只加热有效圈内的凸轮。曲轴感应器侧面贴上导磁体，也

是一种磁屏蔽形式，见图 1-20。

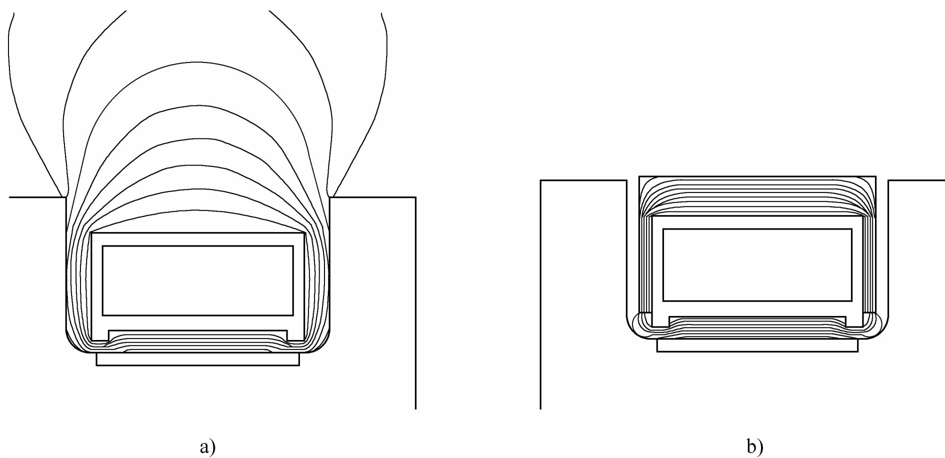


图 1-20　曲轴感应器上的磁屏蔽

a）无屏蔽　b）完全屏蔽

第2章　感应加热电流频率的选择与电源功率的估算

35. 电流频率选择的原则是什么？

电流频率选择得恰当与否，将在以下几个方面产生影响：①零件淬火生产率；②技术经济指标；③淬硬层组织的均匀性；④零件淬裂的倾向性；⑤零件的疲劳强度。

（1）加热类型应首先选择透入式加热　透入式加热的实质是：

$$d_{热} > D_s \tag{2-1}$$

$$d_{热} = \frac{500}{\sqrt{f}}\text{mm}(850℃\ 时) \tag{2-2}$$

代入式（2-1），得

$$\frac{500}{\sqrt{f}} > D_s \tag{2-3}$$

左、右两边平方

$$\frac{250000}{f} > D_s^2$$

$$f < \frac{250000}{D_s^2} \tag{2-4}$$

式中　f——电流频率（Hz）；

D_s——淬硬层深度（mm）。

式（2-4）说明，为获得透入式加热，电流频率有一个上限值，它与淬硬层深度有直接关系，淬硬层深度要求越深，电流频率应越低。

（2）电流频率不能太低　选择电流频率时，频率 $< \frac{250000}{D_s^2}$，能获得透入式加热，这是毫无疑问的；但电流频率也不能太低，电流频率太低时，$d_{热}$ 值就太大；此时如要求 D_s 很浅时，就要求发电机功率很大，而感应器上的功率损失亦相应增大。经验证明，当感应器上的功率损失 $\Delta P > 0.4\text{kW/cm}^2$ 时，感应器即使通水冷却，仍将强烈发热而影响正常工作。因此，感应器上的功率损失数值又决定了淬火时所用电流频率的下限。根据经验，当 D_s 与 $d_{热}$ 符合以下条件时，感应器上的功率损失 ΔP 还不至于超过 0.4kW/cm^2。即

$$D_s > 0.25d_{热} \tag{2-5}$$

$\because d_{热}=\frac{500}{\sqrt{f}}$代入式（2-5）

$$D_s > 0.25 \times \frac{500}{\sqrt{f}}$$

不等式两边平方

$$D_s^2 > \frac{15625}{f}$$

$$\therefore \quad f > \frac{15625}{D_s^2} \tag{2-6}$$

式中　f——电流频率（Hz）；

D_s——要求的淬硬层深度（mm）。

式（2-6）说明，透入式加热时，为保证感应器可靠地工作，电流频率应有一个下限值。

结合式（2-4）与式（2-6）

$$\frac{15625}{D_s} < f < \frac{250000}{D_s^2} \tag{2-7}$$

式（2-7）说明了透入式加热时，电流频率选择的范围。实际工作时，一般认为淬硬层深度为电流热透入深度的一半时为最佳。即：

$$D_s = 0.5d_{热} \tag{2-8}$$

$$\because \quad d_{热} = \frac{500}{\sqrt{f}}$$

$$\therefore \quad D_s = 0.5 \times \frac{500}{\sqrt{f}}$$

二边平方

$$D_s^2 = \frac{62500}{f}$$

$$f_{最佳} = \frac{62500}{D_s^2} \tag{2-9}$$

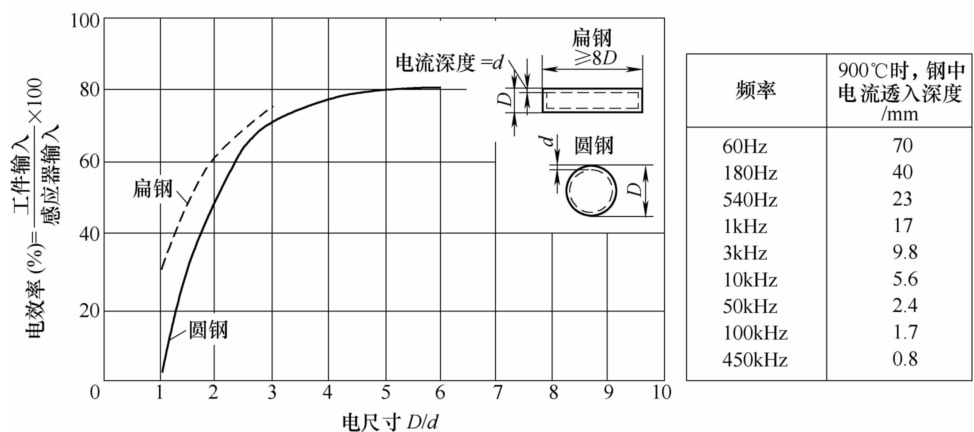
（3）感应器电效率要高　电流频率选择时，除考虑获得透入式加热、感应器能可靠工作因素外，还要考虑感应器的电效率。感应器的电效率取决于零件直径（厚度）与电流热透入深度的比值 $D/d_{热}$。此值又称为电尺寸。

当　$D/d_{热}>6$ 时，$\eta_{感}\approx0.8$　（2-10）

当　$D/d_{热}=3.5$ 时，$\eta_{感}\approx0.7$　（2-11）

图 2-1 示出了电尺寸与感应器电效率的关系。

根据零件直径，选取合适的电流频率使感应器的电效率为 0.7～0.8 时，可用以下公式计算。



频率	900℃时，钢中电流透入深度/mm
60Hz	70
180Hz	40
540Hz	23
1kHz	17
3kHz	9.8
10kHz	5.6
50kHz	2.4
100kHz	1.7
450kHz	0.8

图 2-1　电尺寸对加热效率的影响

材料：中碳钢　温度：900℃

感应器：圆筒式　内径 =1.3D

1）当要求 $\eta_{感}=0.8$ 时，$6<D/d_{热}\leqslant 10$，

设 $D/d_{热}<10$　$\because d_{热}=\dfrac{500}{\sqrt{f}}$

$\therefore \dfrac{D}{\dfrac{500}{\sqrt{f}}}<10$　$D<\dfrac{5000}{\sqrt{f}}$

不等式两边平方

$$D^2<\frac{25\times10^6}{f}$$

$$f<\frac{25\times10^6}{D^2} \tag{2-12}$$

式中　D——零件外径（mm）。

式（2-12）规定了电流频率的上限。

2）当 $D/d_{热}=3.5$ 时，$\eta_{感}$ 即降到 0.7

为使 $\eta_{感}>0.7$，$D/d_{热}>3.5$

$\therefore \dfrac{D}{\dfrac{500}{\sqrt{f}}}>3.5$，$D>\dfrac{1750}{\sqrt{f}}$

不等式两边平方

$$D^2>\frac{3062500}{f}$$

$$f>\frac{3062500}{D^2} \tag{2-13}$$

式（2-13）规定了电流频率的下限。

结合式（2-12）与式（2-13），得出：

$$\frac{3062500}{D^2} < f < \frac{25 \times 10^6}{D^2} \tag{2-14}$$

36. 电流频率选择时，是否都要进行计算？

电流频率的选择主要是选择频率范围，也即选择频带，不是要准确地选择某一个频率的数值，那是毫无实际意义的。应该说，8kHz 与 10kHz 基本上是相同的；25kHz 与 3kHz 也可通用；但 8kHz 与 30kHz，30kHz 与 250kHz 就不能通用了，因为它们不在一个频带，有一个数量级的差别。

高频、中频电源设备的频率，各国均有额定频率。根据不同零件的直径与淬硬层深度要求可按表 2-1、表 2-2 选取合适的频率。

表 2-1　标准频率值的淬硬层深度

频率/kHz		250①	70	35	8	2.5	1.0	0.5
淬硬层深度/mm	最小	0.3	0.5	0.7	1.3	2.4	3.6	5.5
	最大	1.0	1.9	2.6	5.5	10	15	22
	最佳	0.5	1	1.3	2.7	5	8	11

① 在 250kHz 时，由于热传导作用极快，实际数据可比表中数值为大。

表 2-2　圆柱零件表面淬火时频率的选取

频率/kHz	允许最小直径/mm	推荐直径/mm	频率/kHz	允许最小直径/mm	推荐直径/mm
1.0	55	160	35.0	9	26
2.5	35	100	70.0	6	18
8.0	19	55	250.0	3.5	10

表 2-3 为美国 John Deere 公司拖拉机厂零件感应淬火时的电流频率选择图表，已将零件直径与淬硬层深度结合在一起，也可作为电流频率选择的参考图表。

表 2-3　感应淬火零件电流频率的选择

电源设备 / 感应淬火零件		类　别	机式发电机固态电源			高频发生器		
		功率/kW	7～2000			5～600		
		频率/kHz	1	3	10	50～100	200～600	1000
直径/mm	淬硬层深度/mm							
≤12	0.2 最小							A
	0.7						A	B
13～18	0.7 最小					B	A	
	2				B	A	A	

（续）

电源设备 / 感应淬火零件		类　别	机式发电机固态电源			高频发生器		
		功率/kW	7～2000			5～600		
		频率/kHz	1	3	10	50～100	200～600	1000
19～59	2　最小				A			
	4			A	B			
≥60	3.5　最小		A	B	C			

注：1. 表中淬硬层深度取自热轧中碳钢，淬硬层深度测至 45HRC 处。

2. 最小淬硬层深度取决于短时加热的材料性能（预先热处理状态），最大淬硬层深度取决于材料淬透性与表面过热度。

3. A 表示最适合频率；B 表示较适合频率；C 表示适合性较差的频率。

37. 齿轮的电流频率如何选取？

齿轮加热时，合适的电流频率能使齿顶与齿根温度均匀一致。当电流频率过高时，齿顶温度偏高；当电流频率过低时，齿根温度会偏高。

齿轮电流频率的选择，与齿的模数有直接联系。另外，功率密度的大小与齿顶、齿根温度均匀性也有很大关系。要达到沿齿轮廓淬火，加热时间一定要短，电流频率选择得恰好使齿槽产生的电能比齿部的大一些（以补偿齿槽部传走的热量）。下式在加热齿轮时选取频率比较符合实际，它是在 $f=\frac{600000}{m^2}$ 这个公式基础上，通过系列试验修正而得的。即

$$f=\frac{250000}{m^2} \tag{2-15}$$

式中　f——电流频率（Hz）；

m——齿轮模数（mm）。

不同模数齿轮淬火时的合适电流频率值见表 2-4。

表 2-4　不同模数齿轮淬火时的合适频率

齿轮模数 m/mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
电流频率/kHz	250	62.5	28	16	10	7	5	4	3	2.5

必须指出，采用上表电流频率时，加热时间与齿轮模数也有密切关系。加热时间应尽可能接近下式。

$$\tau_{加热}\approx 0.05m^2 \tag{2-16}$$

式中　$\tau_{加热}$——加热时间（s）；

m——齿的模数（mm）。

根据式（2-16）计算出的加热时间是非常短的，亦即要求很大的功率密度或很大的电源设备功率，实际生产中一般不易具备此条件，因此齿轮沿齿轮廓淬火向低

淬透性钢方向发展，它不受设备功率的限制。

38. 齿轮单频法选频的新的数据有哪些?

1）现在俄罗斯高频电流研究院有人又提出新的观点，其计算方法是以电流热透入深度不大于1/2齿顶宽度为准则，否则会导致电效率降低（电流互相抵消）。图2-2所示为齿轮各部尺寸要素。因齿顶宽 $d_3=0.84m$，若要 $d_{热}\leqslant d_3/2$，即 $d_3\geqslant 2d_{热}$，则临界模数 $m_{临界}$ 与临界齿顶宽 d_{3kp} 的关系为 $m_{临界}=d_{3kp}/0.84$。据此，建议单频法选频时标准频率对应的齿轮模数如表2-5所示。

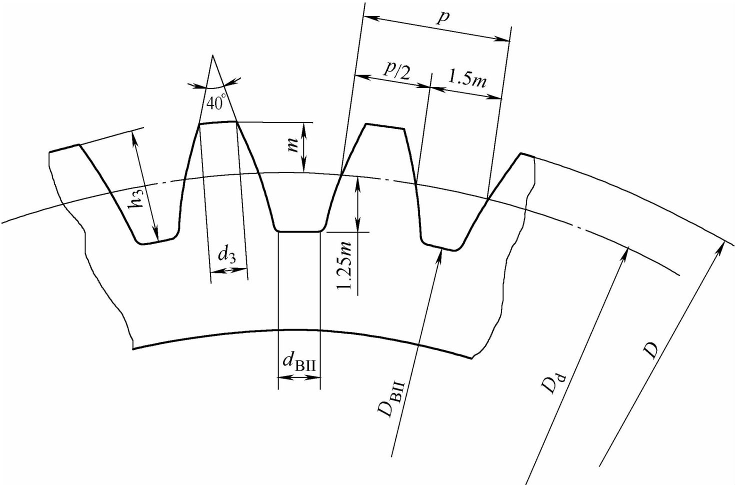


图2-2　齿轮各部尺寸要素

表2-5　单频法选频时标准频率对应的齿轮模数

频率/kHz	2.4	4	10	66	440	1760
电流热透入深度 $d_{热}$/mm	10	7	5	2	0.8	0.4
临界齿顶宽 d_{3kp}/mm	20	14	10	4	1.6	0.8
临界模数 $m_{临界}$/mm	23.8	16.7	11.9	4.8	1.9	0.95
采用模数 $m_{采用}$/mm	24	16	12	5	2	1

由表2-5可见，对于 $m=24$mm 的轮齿，频率应≥2.4kHz；

$m=16$mm 的轮齿，频率应≥4.0kHz；

$m=12$mm 的轮齿，频率应≥10kHz；

$m=5$mm 的轮齿，频率应≥66kHz；

$m=2$mm 的轮齿，频率应≥440kHz；

$m=1$mm 的轮齿，频率应≥1760kHz。

2）德国一家感应加热公司提出齿轮在高功率密度快速加热下的选频公式为：

$$f=300/m^2$$

式中 f——电流频率（kHz）；

m——齿轮模数（mm）。

表 2-6 所示为按此式得出的选频数据。

表 2-6 高功率密度、短时间加热时、齿轮选频数据

齿的模数/mm	2	3	4	6	8	10
电流频率/kHz	75	30	20	10	5	3
电源功率密度/(kW/cm^2)	6	4	3.5	2.2	1.6	1.3
加热时间/s	<1	<1	<1	1.5	2.5	4.0

39. 凸轮加热时是否有特殊的频率计算公式？

凸轮加热时，当电流频率低于最佳频率时，桃尖温度加热不足；反之，当电流频率高于最佳频率时，桃尖温度过高。下式可作为凸轮电流频率选择的参考公式：

$$f = \frac{380000}{r^2} \tag{2-17}$$

式中 f——电流频率（Hz）；

r——桃尖半径（mm）。

曾将此式与实际生产进行验证，4125 发动机凸轮轴桃尖 $r=6.6$mm，代入上式求得最佳频率 =8723Hz，实际采用 $f=2500$Hz，此时，桃尖加热温度偏低，生产中采用增加预冷时间来均匀桃尖与圆弧部分的温度。

发动机凸轮、油泵凸轮与刹车凸轮在实际生产中，绝大多数采用 8～10kHz 的中频电源。当发现桃尖温度偏高或偏低时，均采用增加预冷时间来匀温。对凸轮淬火质量未发现有大的影响。

40. 电流频率的选择对淬火零件的强度有何影响？

电流频率选择得恰当与否，除与技术经济指标有密切关系外，应该说，对淬火零件强度是有影响的。表层加热（传导式加热）时，零件表面过热度大，易使零件淬裂，而零件截面上的温度变化曲线又比较平缓，这就使淬硬层的过渡区加宽。已经知道，较宽的过渡区能使表面上的压应力降低，因而降低了零件的强度。一般认为，当过渡区的宽度不超过淬硬层总深度的 1/4 时，能获得最好的结果。

41. 双频加热有哪几种方式？应用在哪些零件上？

双频加热有两种方式：

1）传统的双频加热是先用较低的一种频率预热（钢材居里点温度以下），然后用较高的一种频率作最后（淬火前）的加热，因为预热时钢材是冷态，电流深度浅，用较低频率合适，而过了居里点温度，热态电流深度大大增加（达冷态的

十多倍)，因此，用较高的频率加热，典型应用的零件有 PC 钢筋、冷轧辊双频加热等，此外，链轮与齿轮亦用中频预热，高频作最终加热，其机理则略有不同，中频预热是使齿槽部先加热，储存热量，再用高频加热齿顶以便得到仿齿廓的淬硬层。这种传统的双频加热有两个感应器，两种频率电流各自流到对应的感应器上。

2）最新的双频加热法称为同步双频加热法，简称 SDF 法，目前主要用于齿轮仿齿廓淬火。它的实质是将两种不同频率的电流同时通向一个感应器，同时进行齿轮加热，低频加热齿槽，高频加热齿顶。

42. 钢管焊缝用感应加热退火，应如何选择电流频率？

钢管焊缝退火采用感应加热法时，实际上是感应正火，因为钢管焊缝加热后是在空气中冷却的，正火的目的是使焊缝部分的晶粒细化，消除因偏析所产生的硬点(低碳马氏体)。由于焊缝正火必须将管壁透热，因此，感应加热的热态电流深度应大于管壁厚，即 $d_{热} \geq$ 管壁厚度。实际生产中使用的一般中频电源只要其 $d_{热}$ 大于管壁厚度，均能选用。从另一角度考虑，电流频率与生产的噪音大小有关，频率越低，噪声越高，因此频率也不要过低。现在焊缝退火中，大多使用 2.5 ~ 3kHz，厚壁管则在 1kHz 及以下。

43. 钎焊刀具时，如何选择电流频率？

钎焊刀具时，工艺上要求刀具基体部分的温度应大于钎料的温度，而钎焊加热时间又较长，因此有热传导的过程。从刀杆加热部分温度均匀性考虑，中频电流应优于高频电流，它与刀杆截面与加热电流途径有关。早期的钎焊刀具大多采用高频电源，这主要考虑与工具其他零件的通用性。如果专为刀具钎焊选焊用电源，应按照刀具截面及钎焊面电流温度分布均匀来选择电流频率。

44. 钢材透热时电流频率应怎样选择？

感应加热主要是表面淬火，因此透热的应用极少，只有低淬透性钢允许深层加热；轧辊等零件，其淬硬层深度要求特深，要求的加热层亦特深，还有钢板等零件要求透热淬火。钢材透热时电流频率的选择见表 2-7。

表 2-7　钢材透热时电流频率的选择

坯件直径/mm	电流频率/Hz	
	低于居里点	高于居里点
6 ~ 12	3000	450000
12 ~ 25	960	10000
25 ~ 38	960	3000 ~ 10000
38 ~ 50	60	3000
50 ~ 150	60	960
> 150	60	≤60

从表 2-7 得知，坯件加热在居里点以下温度时，因电流透入深度浅，频率可以为

居里点的十几分之一，如果采用双频加热，如 PC 钢筋，居里点前后采用不同的电流频率可提高加热效率。最近，国内已研制出 30Hz 变频电源用，以加热大直径钢坯。

45. 钢管与铜管加热时如何选择电流频率？

钢管与铜管加热一般为透热，因此，选择频率时，应使热态电流深度 $d_{热} \geqslant$ 钢管壁厚。

表 2-8 列出了螺管式感应器加热钢管与铜管时的最佳频率，表 2-9 列出了各种频率时钢管加热得到最高效率的最佳壁厚（高于居里点时）。

表 2-8　螺管式感应器加热钢管与铜管时的最佳频率

管外径/mm	壁厚/mm	最佳频率/kHz		
		20℃	800℃	1200℃
非磁性钢				
12.7	1	51	85	92
	2	28	47	50
	3	21	34	37
25.4	1	25	41	44
	2	13	21	23
	3	8.9	15	16
	5	5.9	9.8	11
50.8	1	12	20	22
	2	6.1	10.1	11
	3	4.2	6.9	7.5
	5	2.6	4.3	4.7
76.2	1	7.9	13.2	14.3
	2	4	6.7	7.2
	3	2.7	4.5	4.9
	5	1.7	2.8	3
102	1	5.9	9.9	10.6
	2	3	5	5.4
	3	2	3.4	3.6
	5	1.2	2.1	2.2
纯铜				
12.7		1.33	3.7	6.3
		0.73	2	3.4
		0.54	1.5	2.5

（续）

管外径/mm	壁厚/mm	最佳频率/kHz		
		20℃	800℃	1200℃
纯铜				
25.4		0.64	1.8	3
		0.33	0.92	1.6
		0.23	0.64	1.1
50.8		0.31	0.87	1.5
		0.16	0.44	0.8
		0.11	0.3	0.51

表 2-9　各种频率时钢管加热得到最高效率的最佳壁厚（高于居里点时）

频率/Hz	管径/mm									
	5	10	20	50	100	200	300	500	10000	20000
50							25	15	7	3
150						25	10	5	2.1	1
500					20	5	2.5	1.5	0.75	0.3
1000					10	4	1.3	0.7	0.4	0.15
2400				10	3	1.5	0.6	0.3	0.13	
4000				5	2	0.8	0.3	0.18	0.07	
10000			5	1.8	0.7	0.35	0.13	0.08		
70000		2	0.6	0.21	0.11					
440000	0.6	0.2	0.09							

46. 非铁金属感应加热时如何选择频率？

非铁金属（如铜棒、铝棒）感应加热时，其频率选择与铁磁材料不同。

1）因为它是非磁性材料，所以它的磁导率 $\mu=1$，相当于钢铁居里点后的数值。

2）它的电阻率比钢低得多。

因此，它的电流透入深度比钢热态电流深度为低，非铁金属感应加热常常是透热工艺，为使感应加热的电效率不低于 0.7，一般要求零件直径为电流透入深度的 4 倍以上。

非铁金属棒材感应加热时，临界频率（即最低频率）$f_{临}$（Hz）可按下式计算：

$$f_{临} = 4 \times 10^8/(\rho\mu a^2)$$

非铁金属棒材感应加热时，临界频率（即最低频率）$f_{临}$（Hz）可按下式计算：

$$f_{临} = 1.27 \times 10^8/(\rho\mu a^2)$$

式中　ρ——材料的电阻率（Ω·cm）；

a——材料的直径或厚度（cm）。

应该说明的是当低于临界频率时，零件上的涡流会互相抵消，电效率大大降低；而高于临界频率时，涡流是只在热态电流透入深度这一层流动，心部无加热区。非铁金属特别是纯铜的热导率很高，所以频率只能高于临界频率。

47. 不同硬化层深度与不同直径零件的电流频率如何选择？

对不同硬化层深度与不同直径零件的电流频率选择原则，主要有以下两条，即零件直径最好是热状态下电流透入深度的 4 倍以上，此时感应器电效率高；热状态下的电流透入深度最好是零件硬化层深度的 2 倍左右，此时为透入式加热，热效率高。不同硬化层深度所需的电流频率见表 2-10。

表 2-10　不同硬化层深度所需的电流频率

硬化层深度/mm	工件直径/mm	频率/kHz				
		1	3	10	50	450
0.3～1.2	6～25				1	1
1.2～2.5	11～15			2	1	1
	16～25			1	1	1
	25～50		2	1	1	1
	>50	2	1	1	1	3
2.5～5	19～50		2	1	1	3
	50～100	2	1	1	1	3
	>100	1	1	2	1	3

注：1—高效率，2—较低效率，3—不适合。

48. 最先进的选择电流频率的方法是什么？

最先进的电流频率选择方法是计算机模拟法，现在已有计算机模拟软件，可以同时选取功率和频率。供用户通过计算机模拟进行模拟工艺试验，求出最佳的设备频率与所需功率。例如，用 ELTA 计算机软件研究一个 ϕ40mm 的轴，硬化层深度为 5mm，推荐频率范围为 1.2～10kHz，最佳频率大致在 2.5kHz。

设钢奥氏体化的最低温度为 800℃，最高短时加热温度为 1000℃（45 钢），采用一个不变的感应器进行模拟试验。

模拟结果如表 2-11 所示。

表 2-11　ϕ40mm 轴计算机模拟感应淬火结果

频率/kHz	加热/s	感应器功率/kW	能耗/kW·s	效率（%）	感应器端电压/V	功率因数
1	1.2～2.5	250～120	310～300	71～74	23～15.1	0.48～0.49
1.5	2.1～3.0	122～87	256～262	78～79	17.6～15.0	0.52

（续）

频率/kHz	加热/s	感应器功率/kW	能耗/kW · s	效率（%）	感应器端电压/V	功率因数
2. 5	4. 1	60. 2	245	83	15. 0	0. 55
3	4. 6	53. 0	244	83	15. 4	0. 56
6	7. 5	33. 2	249	85	16. 2	0. 54
10	10. 0	25. 5	255	86	17. 8	0. 51
20	14. 2	18. 2	258	88	20. 0	0. 47
30	16. 7	15. 8	264	88	23. 8	0. 45

注：频率、感应器电压、功率因数均为加热周期中的平均值。

1）前已述及淬硬层深为电流热态透入深度的 1/2 时，热效率最高。从表 2-11 中亦可看出，*f* 为 2. 5kHz 及 3kHz 时，能耗最低，各为 245kW · s 及 244kW · s 功率因数各为 0. 55 及 0. 56，亦为同类中最高。功率因数在此时也高，其意义是电容量减少而变压器效率高。

2）采用比最佳频率为高的频率，得到较高的电效率，但加热时间大大增加（在 30kHz 时，增长到 4 倍），总能耗亦增加了，但不超过 10%。

3）用比最佳频率为低的频率时，能得到较快的加热，但电效率及功率因数下降，感应器所需功率大大增加。

4）当频率大大低于最佳频率时（如为 1kHz），加热过程变为较低效率，而感应器损耗可达到一个不能接受的数值。

5）感应器端电压在上述最佳频率左右很大范围内基本上是相同的，说明在改变频率时，变压比基本上可以不变。

49. 什么是 GP 型高频电源？

高频电源在早期称作高频电炉，应用得最早的型号是从苏联进口的 ЛГЗ-60 或 ЛГПЗ-60，Л 代表真空管式（灯式），Г 代表发电机，З 表示淬火，П 则表示熔炼，所以 ЛГПЗ 表示真空管式发电机淬火并熔炼两用的，60 表示输出功率为 60kW。现在国产高频设备旧型号则用 GP60—CR3 表示，GP 表示高频感应加热设备，60 表示输出功率为 60kW，C 表示淬火，R 表示熔炼，最后一个字母是型号的序号；新型号则用 GGC-50-2 表示，GG 表示高频感应设备，C 表示淬火，50 表示输出功率为 50kW 值，2 表示频率为 200 ~ 250kHz。

真空管式高频电源的组成方框图和电压波形见图 2-3。

高频电源既有工频高压，又有直流高压和高频高压，因此使用和操作应特别注意安全。现在企业中新旧型号均有，早期整流部分采用闸流管部分均已改为高压硅堆了，三相交流电源经三相交流调压器供电给阳极变压器，再经三相高压硅堆整流，输出直流高压给真空管振荡器，使其产生高频电流经过降压变压器到感应器并

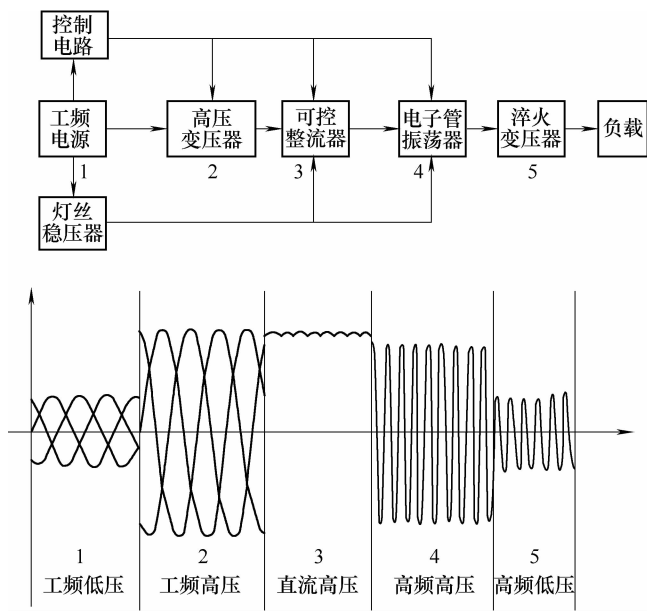


图 2-3　真空管式高频电源的组成方框图和电压波形

加热工件，见图 2-4。

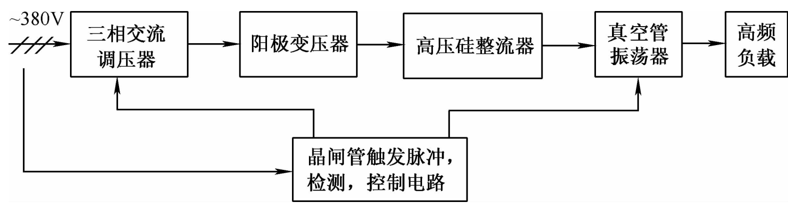


图 2-4　真空管式高频电源的组成框图

真空管式高频电源输出功率的调节有两种途径：

1）调整三极管阳极电压的大小，可改变输出功率。

2）进行匹配调节，亦即是调节阳极电流与栅极电流的比值，使振荡器工作在临界或稍过压状态，此时能在一定的阳极电压下获得最大的功率输出。

50. 什么是 CYP 超音频电源？

CYP 超音频电源是指真空管式频率在 20～100kHz 范围内的感应加热电源。因为音频频率为 20kHz，又因为大于 100kHz 的频率已划入高频频段，所以大于 20kHz 且小于 100kHz 的频率称为超音频。

超音频的电流深度更适合一般零件的淬硬层深度（1.5～2.0mm），并且对中模数 $m=4$mm 左右齿轮的淬硬层比高频电源的淬硬层更优。俄罗斯用的超音频电源额定频率为 66kHz，国内现在生产的频率为 30～50kHz，老型号的超音频电源用 CYP100－0.035－C 命名，CYP 表示超音频感应加热设备，100 表示输出功率为

100kW，0.035表示频率为35kHz。新型号超音频电源的命名，如GGC150-0.3，GGC表示感应加热淬火，150表示输出功率为150kW，0.3表示频率为30～40kHz。

在振荡电路图方面，超音频电源与高频电源相似，只是由于频率较高频低，电容量更大一些，因为$f=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$，要使$f$降低，只有改变$L$及$C$两个数值。

51. 什么是KGPS晶闸管中频电源？

晶闸管中频电源过去的名称是可控硅中频电源（简称SCR）。以KGPS-700-2.5型来说，KG表示晶闸管，P表示变频，S表示水冷，700表示额定功率为700kW，2.5表示额定频率为2.5kHz。

晶闸管中频电源于20世纪80年代开始逐步替代了原有的机械式中频发电机。其优点如下：

1）节能，它的变频效率可达90%，而中频发电机变频效率只有70%～80%。

2）它是静止变频，没有振动，装置体积较小且重量轻。

3）启动、停止方便，机式中频发电机启动费时，再次启动则要等一定的间隔周期。

4）额定容量大而负载小时，装置的效率还是高的，它不怕大马拉小车，晶闸管电源的频率范围与机式中频发电机相似，在0.5～10kHz功率范围则可达数千千瓦。

晶闸管中频电源的电路有并联谐振与串联谐振两种，目前产品以并联电路为主，图2-5所示为晶闸管电路结构框图。

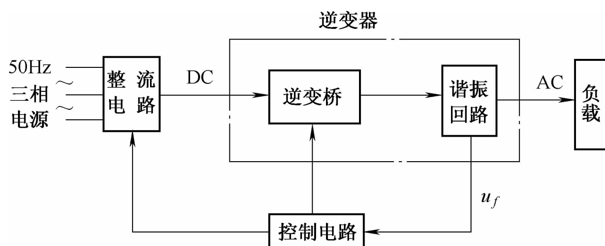


图2-5　晶闸管电源电路结构框图

晶闸管中频电源由三相380V电源供电，经三相桥式全控整流电路转换为直流到逆变部分，转为中频进入谐振回路，最后到负载，在淬火应用中，负载常是淬火变压器及感应器与工件。国产晶闸管中频电源的中频电压均为750V。

52. 什么是IGBT晶体管电源？

IGBT绝缘栅双极晶体管电源是双极型晶体管BIT和MOSFET晶体管的复合。双极晶体管饱和压降低，载流密度大，但驱动电流也大；而MOSFET晶体管为电压驱动型，它的驱动功率小，载流密度小，开关速度快，导通压降大。IGBT晶体管综合了两种器件的优点，成为驱动功率小而饱和压降低、导通损耗小的新型器件。

IGBT 晶体管电源与晶闸管中频电源相比，它的工作频率比晶闸管高，可达 100kHz。它的效率也比晶闸管略高。因此，它既是超音频电源，也可作中频电源，它能完全取代真空管式超音频电源，还能代替一部分晶闸管电源，它的发展前途比晶闸管更为广阔。图 2-6 所示为 IGBT 晶体管电源电压型串联谐振式逆变器。

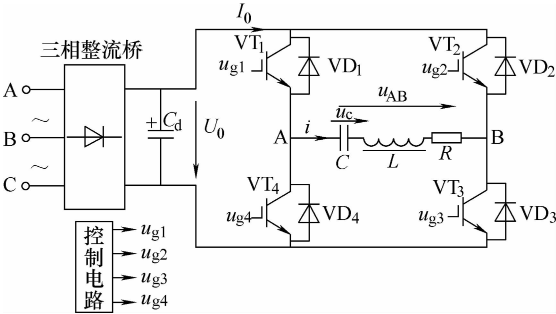


图 2-6　IGBT 晶体管电源电压型串联谐振式逆变器

53. 什么是 MOSFET 晶体管电源？

MOSFET 是 MOS 场效应晶体管的简称，器件的开关时间为几微秒到几十微秒，它是取代真空管高频的晶体管电源，它的输出功率可达 600kW，频率可达 400kHz，逆变器效率为 85% ~90% 。

用于感应加热的高频逆变器主要有电压型串联谐振和电流型并联谐振逆变器。具有自关断能力的中小功率 MOSFET 晶体管电源，多采用串联谐振逆变器，而大功率则多采用电流型并联谐振逆变器。图 2-7 所示为 MOSFET 晶体管高频电源电路图（电压型串联谐振逆变器）。

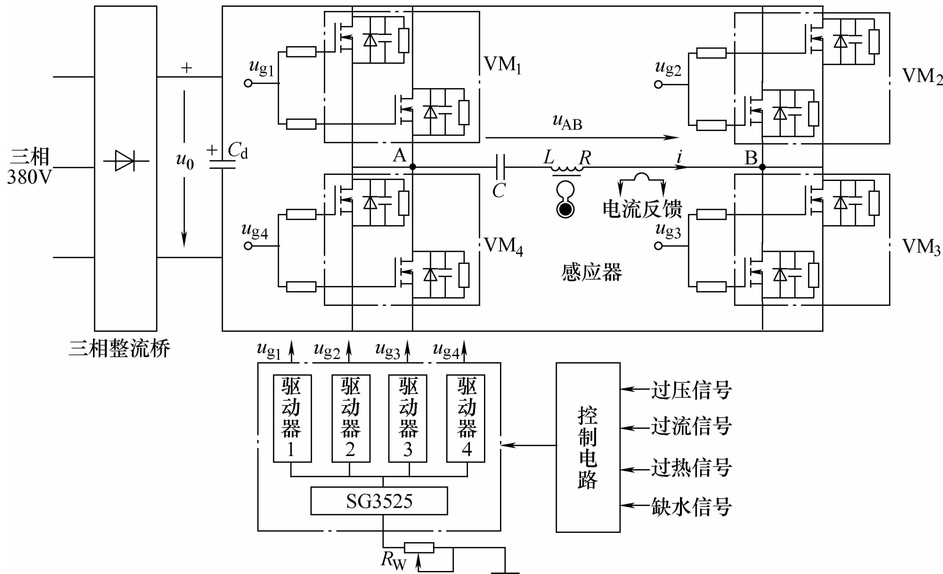


图 2-7　MOSFET 晶体管高频电源电路图

54. 什么是便携式感应加热电源？

顾名思义，便携式感应加热电源以其体积小，便于携带和移动而得名。国内外均有许多种此类电源，它应用于淬火、退火、钎焊等许多场合。为操作方便，它常配备柔性电缆，既有柔性的进线电缆，也有专用的输出电缆，其长度可达 15m；为操作方便及减少损耗，输出端还配有手持变压器，上面可安装小型感应器。这种输出电缆中间是通冷却水的，既冷却电缆也冷却感应器。小功率便携式感应加热电源见图 2-8。

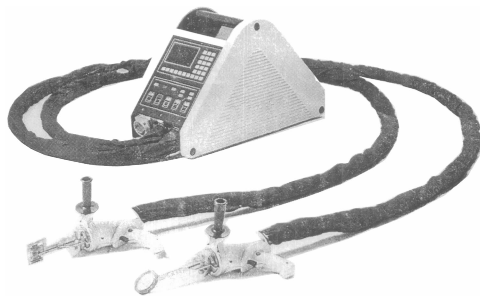


图 2-8　小功率便携式感应加热电源

现在国产小型感应加热电源的额定输入功率已发展到 250kV · A 以上，频率可达 40kHz。这种小型电源在小功率规格上，有采用 220V 单相电源的，适合家庭式工厂作业。另外，小型感应加热电源也开发了一拖二的新产品，即一个电源可供给两个负载交替工作，还开发了双频电源，即既有 0.5kHz 这一档中频频率，又可有 40 ~ 50kHz 这一档超音频频率，其用途更加扩大了。国外产品则有 2kW，150 ~ 400kHz；18 ~ 25kW，10 ~ 25kHz 等品种。

55. 什么是超高频电源？

超高频电源一般指兆赫级频率的感应加热电源。这种电源功率一般较小，主要用于极精细金属件、首饰、毛细管的焊接等，在热处理上用于工业缝纫针板淬火、刀刃淬火、针尖淬火等。

56. 什么是功率密度？它与单位功率是否相同？

功率密度是指加热表面单位面积上得到的功率值，其单位是 kW/cm^2。以前高频淬火时功率密度也称单位功率，即它与单位功率相同。功率密度的大小直接影响工件的加热速度。在一定的电流频率下，功率密度越大，加热越快，时间越短，得到的淬硬层越浅；反之，时间越长，得到的淬硬层越深。

57. 如何根据工件技术要求选用合适的功率密度？

根据工件的技术要求，首先选定合适的电流频率，然后再选用合适的功率密度。图 2-9 所示为根据淬硬层深度选择功率密度和加热时间，可作初步估算的依据。图 2-9 是前苏联学者在 20 世纪 50 年代编制的，当时电源的变频效率较低，现在使用该图时，功率密度值可适当降低一点；该图的另一个不足是它的数据与工件直径无关，实际上工件直径越大，表层向心部传热越快，使用时应考虑这一因素。

58. 高、中频电源装置的功率怎样选定？

高、中频电源装置的功率取决于零件表面以 kW/cm^2 计的功率密度值（P_0）和以 cm^2 计的一次加热表面积 S（cm^2）。

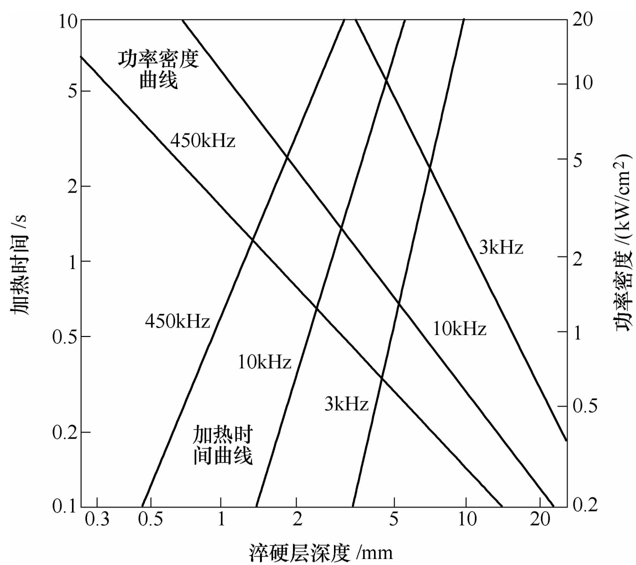


图 2-9　根据淬硬层深度选择功率密度和加热时间

选择功率密度要根据零件尺寸及其淬火技术条件而定。电流频率越低、零件直径越小及所要求的淬硬层深度越小，则所选择的功率密度值应越大。

当使用高频电源时，$P_0 = 0.2 \sim 0.5\mathrm{kW/cm^2}$。

当使用中频电源时，$P_0 = 0.5 \sim 2.0\mathrm{kW/cm^2}$。

不同频率、不同直径（厚度）、不同淬硬层深度要求时，功率密度与加热时间的选取可参考表 2-12 ~ 表 2-15 中的数值。表中数值为有效功率密度值。

有效功率密度 P_0 与中频发电机功率 $P_{发}$、加热表面积 A、淬火变压器效率 $\eta_{变}$、感应器效率 $\eta_{感}$ 等的关系可以用下式表示：

$$P_{发} = \frac{AP_0}{\eta_{变}\ \eta_{感}} \tag{2-18}$$

式中　$P_{发}$——发电机功率（kW）；

A——零件加热表面积（$\mathrm{cm^2}$）；

P_0——有效功率密度（$\mathrm{kW/cm^2}$）；

$\eta_{变}$——淬火变压器效率，常取 0.8；

$\eta_{感}$——感应器效率，常取 0.8。

对于圆柱形工件，加热表面积的计算如下：

$$A = \pi DH$$

式中　A——加热表面积（$\mathrm{cm^2}$）；

D——零件直径（cm）；

H——零件加热宽度（cm），等于感应器有效圈宽度。

表 2-12　f = 2.5kHz 时根据淬硬层深度选取加热时间与功率密度（圆柱外表加热）

零件直径/mm	淬硬层深/mm	加热时间/s	功率密度/(kW/cm²)	淬硬层深/mm	加热时间/s	功率密度/(kW/cm²)	淬硬层深/mm	加热时间/s	功率密度/(kW/cm²)	淬硬层深/mm	加热时间/s	功率密度/(kW/cm²)	淬硬层深/mm	加热时间/s	功率密度/(kW/cm²)	淬硬层深/mm	加热时间/s	功率密度/(kW/cm²)
20	2	0.8	2.65	3	1.5	1.5	4	2	1.18									
30	2	1	2.62	3	2	1.35	4	3.1	1.0	5	5.5	0.65						
40	2	1	2.6	3	2.3	1.28	4	4	0.88	5	7.1	0.58	6	10	0.45	7	13.3	0.38
50	2	1	2.6	3	2.7	1.24	4	4.8	0.81	5	8.5	0.54	6	13	0.41	7	17.8	0.34
60	2	1	2.6	3	3.0	1.21	4	5.2	0.79	5	9.5	0.51	6	15	0.39	7	20.5	0.31
70	2	1	2.6	3	3.1	1.2	4	5.6	0.78	5	10.1	0.5	6	16.1	0.38	7	22.8	0.3
80	2	1	2.6	3	3.1	1.2	4	5.7	0.76	5	10.8	0.49	6	17.2	0.37	7	25	0.29
90	2	1	2.6	3	3.1	1.2	4	6	0.75	5	11.3	0.49	6	18	0.36	7	26.2	0.28
100	2	1	2.6	3	3.1	1.2	4	6	0.75	5	11.7	0.49	6	18.7	0.35	7	27.8	0.28
110	2	1	2.6	3	3.1	1.2	4	6	0.75	5	11.9	0.49	6	19.2	0.35	7	28.5	0.28
厚度/mm	平面零件单面加热																	
10	2	0.7	3.7	3	3	1.8	4	5.9	1.0	5	8.8	0.8	6	11	0.66			
15	2	0.7	3.55	3	3.6	1.62	4	7.9	0.88	5	11.9	0.68	6	16.5	0.54			
20	2	0.7	3.52	3	4.0	1.54	4	3.7	0.78	5	14.2	0.6	6	22	0.46	7	29	0.4
25	2	0.7	3.52	3	4.0	1.54	4	8.7	0.78	5	16.5	0.52	6	27.5	0.4	7	38	0.38
30	2	0.7	3.52	3	4.0	1.54	4	8.7	0.78	5	17.5	0.52	6	29.8	0.4	7	41.5	0.35
35	2	0.7	3.52	3	4.0	1.54	4	8.7	0.78	5	18	0.52	6	30.7	0.4	7	42.7	0.35
40	2	0.7	3.52	3	4.0	1.54	4	8.7	0.78	5	18	0.52	6	31	0.4	7	43.5	0.35
45	2	0.7	3.52	3	4.0	1.54	4	8.7	0.78	5	18	0.52	6	31	0.4	7	44	0.35
60	2	0.7	3.52	3	4.0	1.54	4	8.7	0.78	5	18	0.52	6	31	0.4	7	44.2	0.35

表 2-13　*f*＝4kHz 时根据淬硬层深度选取加热时间与功率密度(圆柱外表加热)

零件直径/mm	淬硬层深/mm	加热时间/s	功率密度/(kW/cm^2)	淬硬层深/mm	加热时间/s	功率密度/(kW/cm^2)	淬硬层深/mm	加热时间/s	功率密度/(kW/cm^2)	淬硬层深/mm	加热时间/s	功率密度/(kW/cm^2)	淬硬层深/mm	加热时间/s	功率密度/(kW/cm^2)	淬硬层深/mm	加热时间/s	功率密度/(kW/cm^2)
20	2	1.0	2.2	3	1.88	1.25	4	2.5	0.98	—	—	—	—	—	—	—	—	—
30	2	1.25	2.17	3	2.5	1.12	4	3.88	0.83	5	6.88	0.54	6	—	—	7	—	—
40	2	1.25	2.15	3	2.9	1.06	4	5.0	0.73	5	8.88	0.48	6	12.5	0.37	7	16.6	0.32
50	2	1.25	2.15	3	3.4	1.02	4	6.0	0.67	5	10.62	0.49	6	16.2	0.34	7	22.3	0.28
60	2	1.25	2.15	3	3.15	1.0	4	6.5	0.65	5	11.9	0.42	6	18.8	0.32	7	25.6	0.26
70	2	1.25	2.15	3	3.9	0.99	4	7.0	0.65	5	12.6	0.41	6	20.1	0.31	7	28.5	0.25
80	2	1.25	2.15	3	3.9	0.99	4	7.13	0.65	5	13.5	0.41	6	21.5	0.30	7	31.2	0.24
90	2	1.25	2.15	3	3.9	0.99	4	7.5	0.65	5	14.0	0.41	6	22.5	0.29	7	32.7	0.23
100	2	1.25	2.15	3	3.9	0.99	4	7.5	0.65	5	14.6	0.41	6	23.5	0.29	7	34.8	0.23
110	2	1.25	2.15	3	3.9	0.99	4	7.5	0.65	5	14.8	0.41	6	24.0	0.29	7	35.6	0.23
厚度/mm	平面零件单面加热																	
10	2	0.88	3.1	3	3.75	1.5	4	7.4	0.83	5	11.0	0.66	6	13.7	0.54	7	—	—
15	2	0.88	3.0	3	4.5	1.3	4	9.9	0.73	5	14.9	0.56	6	20.6	0.49	7	—	—
20	2	0.88	2.9	3	5.0	1.28	4	10.0	0.65	5	17.8	0.49	6	27.5	0.38	7	36.3	0.33
25	2	0.88	2.9	3	5.0	1.28	4	10.9	0.65	5	20.6	0.43	6	34.3	0.33	7	47.5	0.32
30	2	0.88	2.9	3	5.0	1.28	4	10.9	0.65	5	21.9	0.43	6	37.2	0.33	7	51.9	0.29
35	2	0.88	2.9	3	5.0	1.28	4	10.9	0.65	5	22.5	0.48	6	38.3	0.33	7	53.4	0.29
40	2	0.88	2.9	3	5.0	1.28	4	10.9	0.65	5	22.5	0.43	6	38.8	0.33	7	54.3	0.29
45	2	0.88	2.9	3	5.0	1.28	4	10.9	0.65	5	22.5	0.43	6	38.8	0.33	7	55.0	0.29
50	2	0.88	2.9	3	5.0	1.28	4	10.9	0.65	5	22.5	0.43	6	38.8	0.33	7	55.2	0.29

表 2-14　f = 8kHz、10kHz 时，根据淬硬层深度选取加热时间与功率密度（圆柱外表加热）

零件直径/mm	淬硬层深/mm	加热时间/s	功率密度/(kW/cm²)	淬硬层深/mm	加热时间/s	功率密度/(kW/cm²)	淬硬层深/mm	加热时间/s	功率密度/(kW/cm²)	淬硬层深/mm	加热时间/s	功率密度/(kW/cm²)	淬硬层深/mm	加热时间/s	功率密度/(kW/cm²)	淬硬层深/mm	加热时间/s	功率密度/(kW/cm²)
20	2	1.2	1.7	3	3	0.83	4	4.5	0.58	—	—	—	—	—	—	—	—	—
30	2	1.5	1.58	3	3.8	0.78	4	7.0	0.51	5	10	0.38	6	14	0.3	7	18	0.25
40	2	1.8	1.52	3	4.1	0.74	4	8.5	0.48	5	13.7	0.34	6	20	0.26	7	24.5	0.21
50	2	1.8	1.5	3	4.3	0.72	4	9.5	0.46	5	16	0.315	6	24	0.24	7	32	0.19
60	2	1.8	1.5	3	5	0.71	4	10	0.45	5	18	0.31	6	27	0.22	7	38	0.18
70	2	1.8	1.5	3	5.5	0.7	4	10.8	0.44	5	19.3	0.3	6	30	0.21	7	43	0.17
80	2	1.8	1.5	3	5.8	0.7	4	11.5	0.44	5	20.2	0.3	6	32	0.21	7	47	0.17
90	2	1.8	1.5	3	5.8	0.7	4	12	0.44	5	21	0.3	6	34	0.21	7	50	0.17
100	2	1.8	1.5	3	5.8	0.7	4	12.2	0.44	5	22	0.3	6	35.5	0.21	7	52.5	0.17
110	2	1.8	1.5	3	5.8	0.7	4	12.5	0.44	5	22.5	0.29	6	36.5	0.21	7	54.5	0.17
厚度/mm	平面零件单面加热																	
10	2	1.5	1.77	3	4	1.1	4	8.0	0.7	5	10	0.5	—	—	—	—	—	—
15	2	2	1.73	3	5.5	1.0	4	11.5	0.59	5	17.5	0.45	6	24.5	0.38	7	30	0.3
20	2	2	1.72	3	6	0.97	4	13	0.58	5	22	0.41	6	30.5	0.32	7	41	0.26
25	2	2	1.72	3	6	0.97	4	13.5	0.56	5	24.5	0.4	6	35	0.3	7	58	0.22
30	2	2	1.72	3	6	0.97	4	13.5	0.56	5	25	0.4	6	38	0.29	7	62	0.21
35	2	2	1.72	3	6	0.97	4	13.5	0.56	5	25	0.4	6	40	0.29	7	64	0.21
40	2	2	1.72	3	6	0.97	4	13.5	0.56	5	25	0.4	6	42	0.29	7	70	0.21
45	2	2	1.72	3	6	0.97	4	13.5	0.56	5	25	0.4	6	42	0.29	7	71	0.21
50	2	2	1.72	3	6	0.97	4	13.5	0.56	5	25	0.4	6	42	0.29	7	71.5	0.21

表 2-15　$f=250\mathrm{kHz}$ 时，根据淬硬层深度选取加热时间与功率密度（圆柱外表加热）

零件直径/mm	淬硬层深/mm	加热时间/s	功率密度/($\mathrm{kW/cm^2}$)	淬硬层深/mm	加热时间/s	功率密度/($\mathrm{kW/cm^2}$)	淬硬层深/mm	加热时间/s	功率密度/($\mathrm{kW/cm^2}$)	淬硬层深/mm	加热时间/s	功率密度/($\mathrm{kW/cm^2}$)	淬硬层深/mm	加热时间/s	功率密度/($\mathrm{kW/cm^2}$)	淬硬层深/mm	加热时间/s	功率密度/($\mathrm{kW/cm^2}$)
10	2	2.5	0.5															
20	2	4.0	0.44	3	9.0	0.28	4	11.5	0.22									
30	2	7.0	0.43	3	12.5	0.27	4	19	0.205	5	23	0.165	6	29	0.145	7	34	0.125
40	2	8.0	0.425	3	16.5	0.265	4	23	0.195	5	31	0.16	6	39	0.135	7	45	0.115
50	2	9.0	0.422	3	18	0.26	4	28	0.19	5	39	0.155	6	48	0.13	7	56	0.11
60	2	9.3	0.42	3	20	0.255	4	31	0.188	5	43	0.15	6	56	0.125	7	68	0.108
70	2	9.5	0.42	3	20.5	0.255	4	34	0.187	5	49	0.148	6	62	0.12	7	78	0.105
80	2	9.7	0.42	3	21	0.255	4	37	0.187	5	52	0.148	6	69	0.12	7	86	0.103
90	2	9.8	0.42	3	22	0.255	4	38.5	0.187	5	56	0.148	6	73	0.12	7	92	0.102
100	2	10	0.42	3	23	0.255	4	40	0.187	5	59	0.148	6	79	0.118	7	99	0.101
厚度/mm	平面零件单面加热																	
10	2	11	0.42	3	19	0.29	4	26	0.24	5	30	0.205	6	37	0.18	7	40	0.165
15	2	14	0.413	3	26	0.273	4	38	0.22	5	49	0.185	6	58	0.16	7	65	0.14
20	2	17	0.41	3	30	0.26	4	49	0.21	5	62	0.172	6	78	0.15	7	90	0.13
25	2	17	0.41	3	35	0.255	4	56	0.205	5	73	0.165	6	91	0.142	7	112	0.122
30	2	17	0.41	3	37	0.25	4	60	0.20	5	83	0.162	6	107	0.14	7	130	0.12
35	2	17	0.41	3	37.5	0.25	4	64	0.197	5	90	0.162	6	118	0.14	7	148	0.118
40	2	17	0.41	3	38	0.25	4	65	0.195	5	96	0.162	6	127	0.14	7	160	0.118
45	2	17	0.41	3	38	0.25	4	65	0.195	5	98	0.162	6	132	0.14	7	169	0.118
50	2	17	0.41	3	38	0.25	4	65	0.195	5	100	0.162	6	139	0.14	7	178	0.118

当零件加热面积太大，计算出所需发电机功率过大时，可采用连续淬火法。

采用连续淬火法时，由于感应器有效圈宽度大大减小（H 常用值为 14mm、20mm、30mm、40mm、50mm），加热面积亦大大减小，因此可选用较小功率的发电机。如果已有现成发电机，可根据式（2-18）来计算该发电机加热的表面积 A（cm^2）。

$$A = \frac{P_{发} \eta_{变} \eta_{感}}{P_0} \tag{2-19}$$

然后根据所得表面积 A，计算感应器的宽度 H（cm）。

$$H = \frac{A}{\pi D} \tag{2-20}$$

如果从表 2-12 中已查到 P_0 与 t 值，则可以在已确定 H 值的基础上，计算零件或感应器的移动速度。

$$v = \frac{H}{t} \tag{2-21}$$

式中　v——零件或感应器的移动速度（mm/s）；

H——感应器有效圈宽度（mm）㊀；

t——加热时间。

近年来，欧美国家对功率密度、加热时间、发电机功率有一些估算图。通过已知淬硬层深度、所需最高表面温度，可从曲线求得加热时间与功率密度。通过已知零件直径与淬硬区宽度，可从曲线求得淬硬区面积与所需发电机功率。图 2-10 为在 10kHz 电流频率下，用回线型感应器进行一次完成淬火（Single Shot hardening）的功率估算图。图 2-11 为在 10kHz 电流频率下，用半环型感应器进行大曲轴轴颈加热时的功率估算图。

图 2-12 所示为在 10kHz 电流频率下，用回线型感应器进行轴旋转一次加热时，根据淬硬层深度及表面温度要求，估算功率密度与加热时间的图。

必须指出的是，图 2-10 ~ 图 2-12 所用的功率密度均为设备功率密度。即

$$P_{发} = P_{0设} A \tag{2-22}$$

式中　$P_{发}$——发电机功率（kW）；

$P_{0设}$——设备功率密度（kW/cm^2）；

A——加热表面积（cm^2）。

应当指出，当采用回线型感应器加热时，加热面积不是指回线覆盖的面积，而是指回线包容的轴旋转加热的总面积。

图 2-10 使用方法：①选择表面淬硬层的深度；②表面温度范围为 1550 ~ 1650°F㊁（通常），最高 1750°F；③确定功率密度和加热时间；④根据直径与宽度

㊀ 移动速度习惯上用 mm/s，而功率密度与感应器有效圈宽度习惯上用 cm，计算时要注意单位换算。

㊁ 应换成法定计量单位，$1°F = \frac{5}{9}℃$，下同。

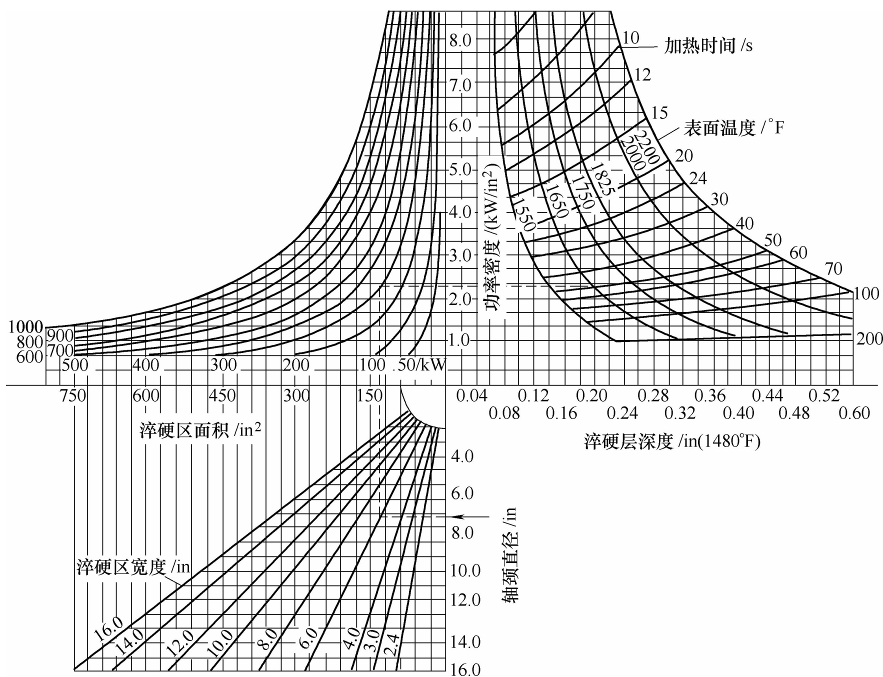


图 2-10 用回线型感应器一次完成淬火的功率估算图

注：$f = 10\text{kHz}$。

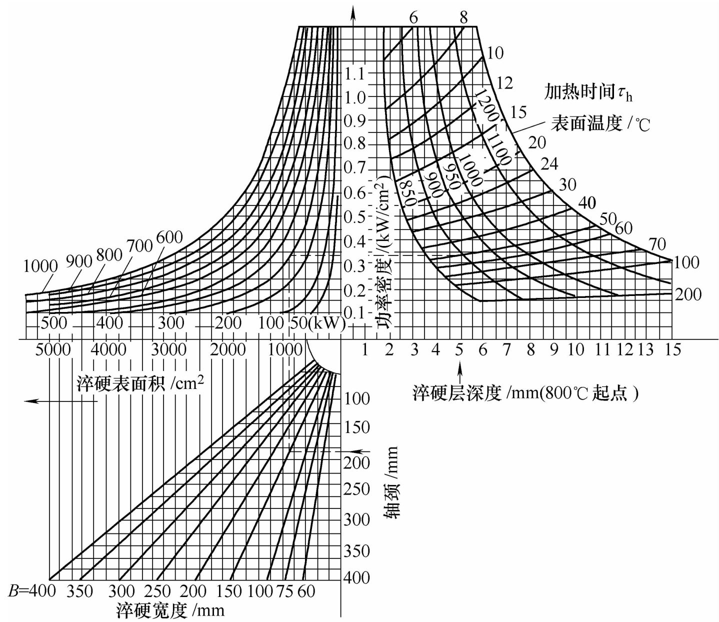


图 2-11 大曲轴用半环型感应器淬火功率估算图

注：$f = 10\text{kHz}$。

确定淬硬面积；⑤从功率密度和加热面积线的交叉点，求出所需功率。

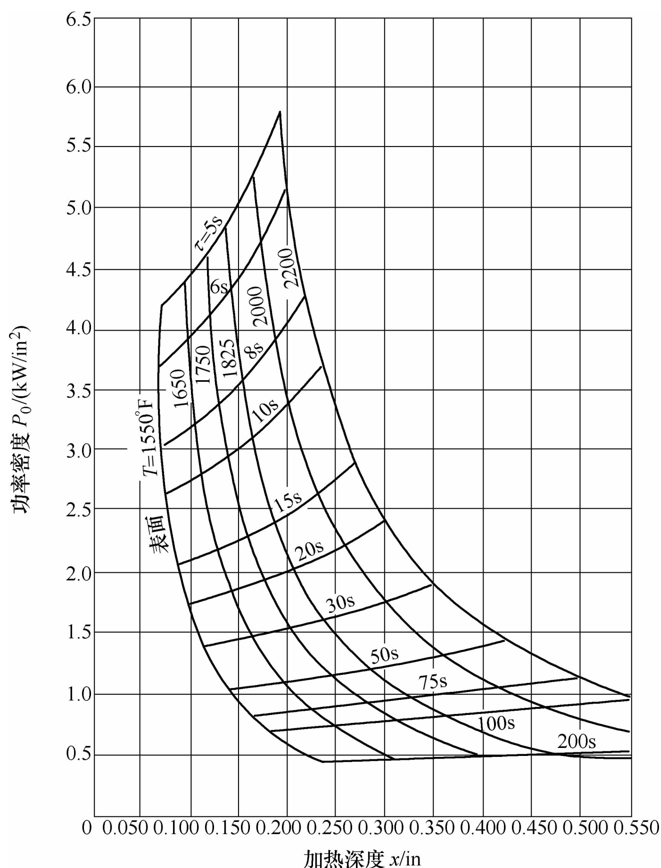


图 2-12 用回线型感应器对轴进行一次加热淬火时的功率密度与加热时间估算图（$f=10$kHz）

注：$1\text{in}^2=6.4516\times10^{-4}\text{m}^2$，下同。

查曲线举例：①淬硬层深度 = 0.21in[㊀]；②最高表面温度 1650°F，加热时间 $t_{加}=50$s；③功率密度 $P_0=2.3\text{kW/in}^2$；④轴颈 $D=7.5$in，淬硬区宽 $B=6$in，面积 $A=135\text{in}^2$；⑤自③、④得 $N_{发电机}=300$kW。

图 2-11 使用方法：①选择淬硬层深度；②表面温度范围 850～900℃，最高温 950℃；③求功率密度与加热时间；④找出淬硬表面的直径与宽度；⑤功率密度与加热表面积的交点表示所需功率。

查曲线举例：①淬硬层深度 = 5mm；②最高表面温度 900℃，加热时间 $\tau_k=50$s；③功率密度 $P_0=0.34\text{kW/cm}^2$；④轴颈 $D=18.5$cm，淬硬区宽 $B=15.2$cm，表

㊀ 1in = 0.0254m，下同。

面积 $A=880\text{cm}^2$；⑤根据③、④，$N_{发电机}=310\text{kW}$。

对于高频发生器，当发生器有效功率不能直接从仪表读出时，则可按下式计算：

$$P_{输入}=nE_AI_A \tag{2-23}$$

式中　$P_{输入}$——振荡部分输入功率（kW）；

n——振荡管数量；

E_A——阳极负载电压（kV）；

I_A——阳极电流（A）。

高频发生器的输出功率也称振荡功率。

$$P_{发}=P_{输入}-P_{阳} \tag{2-24}$$

式中　$P_{发}$——振荡功率；

$P_{阳}$——振荡管阳极上损失的功率。

$P_{发}$（W）可按如下公式计算：

$$P_{发}=\frac{1}{2}U_KI_{1\text{m}} \tag{2-25}$$

或

$$P_{发}=\frac{1}{2}R_KI_{1\text{m}}^2 \tag{2-26}$$

式中　$I_{1\text{m}}$——一次谐波电流的振幅；

R_K——回路等效电阻；

U_K——振荡回路上的电压振幅。

鉴于 $P_{发}$ 计算繁杂，实际应用中常用

$$P_{发}=P_{输入}\eta_A \tag{2-27}$$

式中　η_A——振荡管效率或称阳极效率。

振荡管的效率 η 取决于负载，在良好情况下，η 为 60%～70%。当 E_A 不变时，可表示为 $\eta=f\left(\frac{I_{栅流}}{I_{阳流}}\right)$，即 η 与振荡管阳流、栅流之比有关，亦即与振荡器的工作状态有关。高频发生器的有效功率 $P_{发}$ 求得后，其他计算与中频发电机相同，可以应用式（2-18）、$\eta_{变}$、$\eta_{感}$ 亦可取 0.8～0.85。

为弄清高频发生器输入、输出、整机效率等有关概念，将国产 GP-60CR13 高频设备出厂试验有关数据示出如下：

$$P_{输入}=\text{阳极输入功率 87kW}$$

$$P_{阳}=\text{阳极损耗功率 20.6kW(两管)}$$

$$P_{发}=\text{振荡功率 66.4kW}$$

$$\eta=\text{振荡管效率}=\frac{P_{发}}{P_{输入}}=\frac{66.4}{87}=76.3\%$$

$$P_{变}\ \eta_{变}\ \eta_{感}=\text{加热工件上测得的功率}=52\text{kW}$$

即 $\eta_{变}\eta_{感}=\frac{52}{66.4}=0.78$，即 $\eta_{变}\eta_{感}$ 各为 0.88。

总的耗电功率为 93.6kW。

整机效率 $\eta_{总}=\frac{52}{93.6}=55.5\%$

59. 典型零件如何根据技术要求计算所需功率与选择电源设备？

如图 2-13 所示的一个轴，要求两端淬火淬硬层深度 $D_s=4\sim5$mm，硬度为 54～58HRC，材料为 45 钢，每机 4 件，年产量 10 万台。

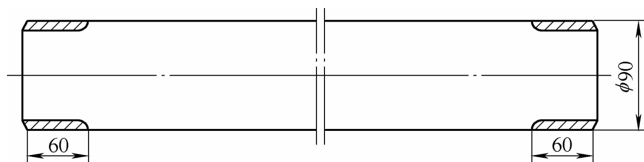


图 2-13　两端要求表面淬火的轴

计算：因年产量 10 万台，每机 4 件，合 40 万件，属大批量生产，应考虑合理的频率，按表 2-1 选择频率。

2500Hz 电流频率时，最佳淬硬层深度为 5mm，符合该零件 $D_s=4\sim5$mm 要求，因此 f 选用 2500Hz。

按表 2-2 核对，为使感应器电效率高，当 $f=2500$Hz 时，推荐直径为 100mm，允许最小直径为 35mm，也符合要求。按照表 2-12，φ90mm 圆柱形零件，$D_s=5$mm 时，加热时间为 11.3s，功率密度为 0.49kW/cm²。

按公式（2-18）　$P_{发}=\frac{\pi\times9\times6\times0.49}{0.8\times0.85}\text{kW}=122.1\text{kW}$

因此，可选用 $f=2500$Hz，$P_{发}=160$kW 的中频电源。生产率计算如下：

轴一端加热时间为 11.3s，$\tau_{热}=11.3$s

两端加热时间 $=\tau_{热1}+\tau_{热2}=11.3+11.3\text{s}=22.6\text{s}$

每件准备时间 $\tau_{准}=30$s

掉头（换向）时间 $\tau_{转}=4$s

冷却时间（感应器喷水）$\tau_{冷}=8$s

每件操作总时间 $\tau_{总}=\tau_{准}+\tau_{热1}+\tau_{冷1}+\tau_{转}+\tau_{热2}+\tau_{冷2}=30+11.3+8+4+11.3+8\text{s}=72.6\text{s}$

每一零件操作总时间 = 72.6s = 1.21min

每机 4 件需时 4×72.6s = 290.4s

每台淬火机床两班制工作时的年时基数为 3820h

40 万件轴的台时为 $400\,000\times\frac{72.6}{3600}=8066$h，一台淬火机两班生产时其负荷率

$=\frac{8066}{3820}=211.2\%$

而中频电源的负载率 $=\frac{\tau_{热1}+\tau_{热2}}{\tau_{总}}=\frac{11.3+11.3}{72.6}=31.1\%$

因此，采用 3 台淬火机两班生产，由一台中频电源交替供电给 3 台淬火机床，淬火机床的负载率为 $\frac{211.2}{3}\%=70.4\%$，而中频电源的负载率为 $31.1\%\times 3=93.3\%$。在此情况下，可以完成年产 10 万台，合 40 万根轴的任务。

60. 如何进行功率估算？

一般采用经验法估算感应加热所需的功率密度，不同淬硬层深度要求碳钢工件在不同频率下的所需功率密度见表 2-16。

电源装置的功率取决于工件表面以 kW/cm^2 为单位计算的功率密度值（P_0）和以 cm^2 计的一次加热面积 A。选择功率密度要根据加热表面积及其淬火技术条件而定，电流频率越低，零件直径越小及所要求的硬化层深度越浅，则所需功率密度应越大。表 2-16 是推荐的输入功率密度值。当使用高频及超音频电源时，P_0 常用 $0.6\sim2.0kW/cm^2$。当使用中频电源时，P_0 常用 $0.8\sim2.5kW/cm^2$。

表 2-16　碳钢在不同频率及功率密度下得到的淬硬层深度

频率/kHz	淬硬层深		低功率密度		高功率密度	
	mm	in	kW/cm^2	kW/in^2	kW/cm^2	kW/in^2
450	0.4～1.1	0.015～0.045	1.1	7	1.86	12
	1.1～2.3	0.045～0.090	0.46	3	1.24	8
10	1.5～2.3	0.060～0.090	1.24	8	2.32	15
	2.3～4.0	0.090～0.160	0.77	5	2	13
3	2.3～3.0	0.090～0.120	1.55	10	2.6	17
	4.0～5.1	0.160～0.200	0.77	5	2.17	14
1	5.1～7.1	0.200～0.280	0.77	5	1.86	12
	7.1～8.9	0.280～0.350	0.77	5	1.86	12
齿轮沿齿廓淬火①	0.4～1.1	0.015～0.045	2.32	15	3.87	25

① 沿齿廓淬火，在 3～10kHz 电流频率下建议用低功率密度。

相同硬化层深度值可以用不同的功率密度与不同加热时间来达到。

较高功率密度与较短加热时间适合于较低电流频率；较低功率密度与较长加热时间适合于较高频率时。前者加热工件表面向心部传导热能少，热效率较高；而后者热传导作用增强，热效率较低。从节能角度与工件硬化层过渡区不要太厚两个观点出发，表面淬火工件的加热时间最好不超过 10s，略长一点也不要超过 15s，特

殊要求例外。

现代化的感应淬火机床，相当部分已配有能量监控仪，以 kW · s 控制淬火工件的硬化层深度。因此，根据所需 kW · s 值，先设定加热时间 s，再以（kW · s）/s 求出所需 kW 值来选择所需感应加热电源的额定功率值（能量监控器上的 kW · s，其 kW 一般是振荡功率）。

61. 如何根据轴颈与淬硬层深度选择功率密度与扫描速度?

根据轴颈与淬硬层深度选择功率密度与扫描速度见表 2-17。

表 2-17　根据轴颈与淬硬层深度选择功率与扫描速度

频率/kHz	淬硬层深度/mm	功率密度/（kW/cm²）	一次完成淬火法加热时间/s	扫描淬火的扫描速度/（mm/s）
3	3.8	1.55	4.0	6.35
		3.10	2.0	12.7
10	2.54	1.55	2.5	11
		3.10	1.0	25.4
450	1.32	1.55	2.0	12.7

62. 如何对正火后的齿轮进行感应淬火功率估算?

对 45、50 钢齿轮，齿轮淬透估算如下：

1）节圆直径为 ϕ127mm（5in）以下小齿轮，功率密度为 0.775kW/cm^2（5kW/in^2）。

2）沿齿廓淬硬，10kHz 下预热功率密度为 0.46 ~ 0.62kW/cm^2（3 ~ 4kW/in^2）。随后在 450kHz 下，最终加热功率密度为 1.55kW/cm^2（10kW/in^2）。

3）将齿轮加热面积 乘以上述功率密度值，即可求出所需感应加热功率值。

63. 设备额定功率不够时，如何感应加热超大工件?

设备额定功率不够时，可按以下方法感应加热超大工件：

1）提高感应器的效率。例如：轧辊直径较大，所用中频电源功率不够，后来在轧辊感应器上镶上硅钢片导磁体，提高了感应器效率，解决了此问题。原来一般认为外圆感应器加导磁体作用不大，实际上外圆感应器加了导磁体后，减少了磁力线逸散而集中到加热区，效率可得到较大提高。

2）将工件在电阻炉进行预热后再进行感应淬火。在罗马尼亚一个拖拉机厂对最终传动齿轮感应淬火前，用电阻炉将齿轮预热到 400℃，然后进行感应淬火，美国也有一家公司采用过类似工艺。

3）用感应加热预热 1 ~ 2 次，然后进行感应淬火。例如：用真空管 60kW 电源，扫描淬火 ϕ100mm 左右轴件，轴件经 1 ~ 2 次预热后，再进行扫描淬火，解决了机修配件的热处理难题。气缸套内孔扫描淬火也采用这种工艺，缸套上升时扫描预热，随后缸套下降进行扫描淬火。

64. 感应热处理是否有电耗定额?

感应热处理是节能热处理，其电耗定额一直是个难题。过去国内的计算方法是以零件总质量来计算的，即每吨感应热处理件耗电多少千瓦时。这就带来一个不公平问题，小工件（如履带板销）的淬火部分与非淬火部分质量差很小，而大件（如大齿轮、曲轴等）只淬一个局部小面积，淬火部分与非淬火部分质量差很多，笼统用一个电耗定额是不公正的。

GB/T 10201—2008《热处理合理用电导则》中已对感应淬火给出了电耗定额，见表 2-18。

表 2-18　感应加热淬火电耗定额

热透深度/mm	≤1	>1 ~ 2	>2 ~ 4	>4 ~ 8	>8 ~ 16	>16
电耗定额/（kW · h/m^2）	≤3	≤5	≤10	≤22	≤50	≤60
折合/（kW · h/kg）	<0.38	<0.32	<0.32	<0.35	<0.4	<0.48

用加热层面积与深度（即体积）来计算电耗定额，这是比较合理的，在今后推行中还可不断修订得更精确。表 2-19 列出了美国一些公司部分金属感应加热的实际电耗，可供设计估算时参考。

表 2-19　部分金属感应加热的实际电耗

材料	加热温度/℃	电耗/（kW · h/t）
碳钢	21 ~ 1230	325
碳钢管淬火	21 ~ 954	200
碳钢管回火	21 ~ 675	125
纯铜	21 ~ 871	244 ~ 278
黄铜	21 ~ 760	156 ~ 217
铝件	21 ~ 454	227 ~ 278

感应热处理有了电耗定额能促进工艺改进，可促使用户选择节能电源、高效淬火机与高效感应器，使节能热处理真正实现节能。

65. 如何配置中频电热电容器?

中频电热电容器在有降压变压器（又称匹配变压器或淬火变压器）与无降压变压器情况下配置的容量是不同的，前者功率因数较高，电容器容量一般按下式计算：

$$P_{容} = P_{发}(1/\cos\phi + 0.5)$$

式中　$P_{容}$——电容器容量（kvar）；

$P_{发}$——发电机功率（kW）；

$\cos\phi$——功率因数，$\cos\phi$ 值可按表 2-20 选取。

表 2-20　有降压变压器感应加热时的 cosφ

频率/Hz	cosφ	频率/Hz	cosφ
1000	0.4 ~ 0.6	100000	0.03 ~ 0.08
2500	0.36 ~ 0.5	300000	0.02 ~ 0.05
8000	0.2 ~ 0.3	500000	0.015 ~ 0.04

注：在感应熔炼与锻件透热时，无降压变压器，此时 cosφ 为 0.07 ~ 0.15。

66. 国产电热电容器有哪些型号与规格?

国产电热电容器近年来向大容量、小体积发展，比早期电热电容器有许多进步，主要规格见表 2-21。RFM 代表浸渍二芳基乙烷，介质全膜结构。

表 2-21　国产电热电容器主要型号

型号	电压/kV	容量/kvar	频率/Hz	电容/μF	重量/kg	长×宽×高/mm
RFM0.75-1000-0.5S	0.75	1000	500	8 × 70	43	510 × 205 × 412
RFM0.75-1000-1S	0.75	1000	1000	6 × 47	26	406 × 142 × 432
RFM0.75-2000-1S	0.75	2000	1000	10 × 57	47	510 × 165 × 520
RFM0.75-1000-25S	0.75	1000	2500	4 × 28	15	373 × 118 × 320
RFM0.75-1000-4S	0.75	1000	4000	4 × 17	12	373 × 118 × 288
RFM0.75-640-8S	0.75	640	8000	4 × 57	8	373 × 118 × 220
RFM0.75-1000-8S	0.75	1000	8000	4 × 8.8	11	373 × 118 × 258
RFM0.75-1700-8S	0.75	1700	8000	6 × 10	23	406 × 142 × 396
RFM0.75-560-10S	0.75	560	10000	4 × 4	8	373 × 118 × 220
RFM0.75-1000-10S	0.75	1000	10000	4 × 7	15	373 × 118 × 320
RFM0.75-360-20S	0.75	360	20000	4 × 1.3	8	373 × 118 × 220
RFM0.75-1000-20S	0.75	1000	20000	4 × 3.5	13	373 × 118 × 312
RFM0.75-560-30S	0.75	560	30000	4 × 1.3	8	373 × 118 × 220
RFM0.75-640-30S	0.75	640	30000	4 × 1.5	12	373 × 118 × 278
RFM0.75-1000-40S	0.75	1000	40000	4 × 1.8	12	373 × 118 × 290
RFM0.75-560-50S	0.75	560	50000	4 × 0.8	8	373 × 118 × 220
RFM0.75-1000-50S	0.75	1000	50000	4 × 1.4	11	373 × 118 × 258
RFM0.75-560-100S	0.75	560	100000	4 × 0.4	8	373 × 118 × 220
RFM0.75-500-250S	0.75	500	250000	4 × 0.16	10	373 × 118 × 247

注：R—二芳基乙烷浸渍，M—全膜介质，S—水冷。

67. 如何配置中频淬火变压器?

中频淬火变压器简称中频变压器，亦称做匹配变压器，其原理图如图 2-14 所

示，一次绕组电压（E_P）和二次绕组电压（E_S）之间的关系，可用两绕组的匝数比来表示：$E_P/E_S = N_P/N_S$。

其功能主要是降压，使感应器参数与中频电源参数相匹配。为减少中频线路元件的损耗，中频电源采用的输出电压在 375 ~ 1500V 之间，现在多采用 650V 及 750V 的电压。淬火装置用的感应器电压，由于结构不同，电压常为 7 ~ 100V 之间，对 100kW 中频电源较常用的为 8 ~ 80V。例如，曲轴半环形感应器所需电压在 8 ~ 10kHz 时常为 65 ~ 80V。

（1）中频变压器的主要参数与要求　中频变压器的容量以 kV · A 作为标称容量。对中频变压器的技术要求一般是：性能稳定可靠，操作方便，结构小，损耗小和价格合理。除此之外，有两点特殊要求：

1）变压系数改变方便。

2）短路阻抗小（这是减少加热规范不稳定所必需的，这种不稳定性会在变压器发生不大的变形情况下发生，它会影响短路阻抗的大小）。

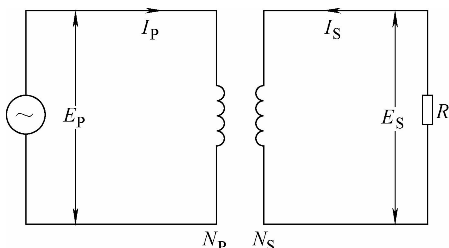


图 2-14　变压器原理电路图

E_P——一次电压（V）　I_P——一次电流（A）
N_P——一次绕组匝数　I_S—二次电流（A）
N_S—二次绕组匝数　E_S—二次电压
R_1—负载阻抗

（2）中频变压器的设计、功能和效率

1）具有筒形一次绕组，固定变压比的外铁心型导磁体（壳式）结构，它的一次绕组是固定匝数，适用于专用淬火机固定产品，如装有分合式感应器的专用曲轴淬火机床，凸轮轴、汽车飞轮齿圈等专用机床。其优点是结构简单，维修方便。

2）具有盘形一次绕组的多匝比外铁心形导磁体结构，它的变压比可以通过变换分接板进行调整，其一次绕组匝数范围为 10 ~ 34 匝。二次绕组通过感应器连接板接为 2 匝或 1 匝。其主要优点是通过调整可适用于不同感应器参数的要求。

3）薄形中频变压器主要为曲轴淬火机床而设计，特点是宽度尺寸薄，厚度只有 62mm，可以适应主轴颈与连杆颈之间因距离很近而必须使多台变压器安装上去的要求。

（3）铁氧体心淬火变压器　其特点是磁心用铁氧体，一般不用水冷，体积小，重量轻。

对中频变压器的配置，在容量选定上一般按中频电源容量的 3 ~ 5 倍考虑。实际上变压器还有一个利用系数，即其负载率因素，负载率低时容量可选小一些，负载率高时容量须选大一些。还有一点是一台变压器在变压比不同时，它的铜损亦是不同的。图 2-15 示出的是两种变压器的特定负载和损耗与二次电压 U_2 的关系曲线。从图表曲线上可看出，当二次电压为 30 ~ 40V 时，变压器损耗最小。

（4）中频变压器与感应器的连接　中频变压器用于大阻抗感应器，常用2匝或3匝的二次绕组，更高一点阻抗则采用中频自耦变压器或感应器直接与中频电源相连。这种感应器常是大直径的多匝感应器。

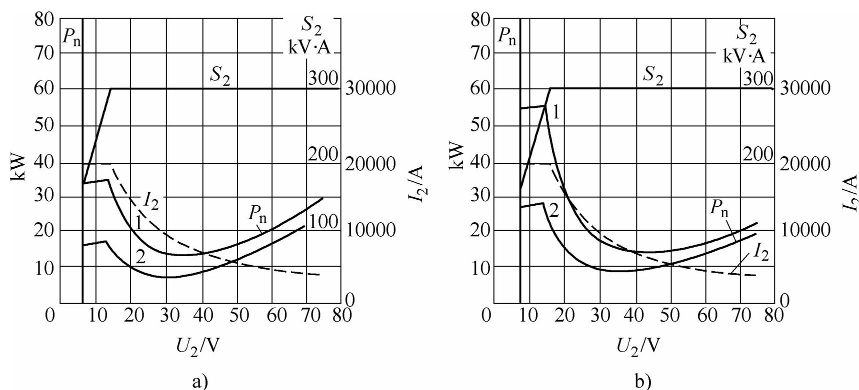


图2-15　变压器特定负载下损耗和二次电压 U_2 的关系

a）频率为2500Hz　b）频率为8000Hz

1—BTO-500型变压器　2—具有盘形绕组的变压器

S_2—输出功率（视在功率）　I_2—二次电流　P_n—损耗功率

第3章　钢铁感应热处理工艺基础

68. 钢铁感应热处理的金属学基础是什么？

钢铁材料是以铁碳为基本组元的复杂合金。钢铁感应热处理的过程同普通热处理一样，是固态相变的过程。其金属学基础包括以下几方面：

（1）纯铁的同素异构转变　纯铁有同素异构转变，可形成体心立方和面心立方两种晶格的同素异构体。纯铁的同素异构转变见图 3-1。在 1538℃时，液态纯铁进行结晶，凝固成体心立方的 δ-Fe；在 1394℃时，发生同素异构转变，转变成面心立方晶格的 γ-Fe；到 912℃时，又发生同素异构转变，转变为体心立方晶格的 α-Fe（无磁性）；继续冷却到 770℃时，α-Fe 变得具有强磁性，而且金属的物理及电气性能均发生变化，这个温度称为居里点，在感应加热过程中，居里点是十分有影响的一个温度点；再继续冷却到室温，α-Fe 不再变化。

（2）铁碳相图　铁碳相图不仅可以表明不同成分的铁碳合金在平衡条件下的成分、温度与组织之间的关系，还可以推断性能与成分、温度的关系。因此，铁碳相图是研究钢和铸铁组织与性能的基础，是制订各种热处理工艺的依据。铁碳相图见图 3-2。

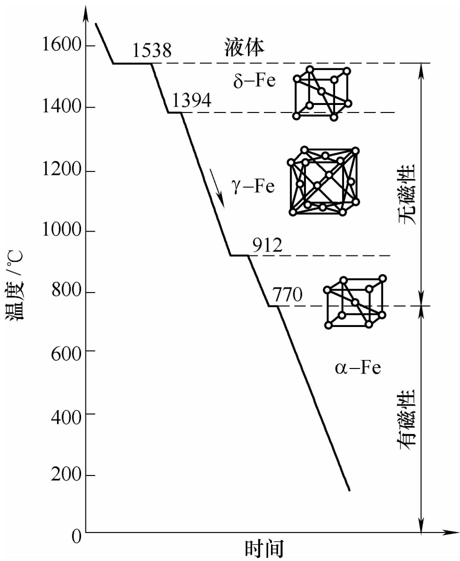


图 3-1　纯铁的同素异构转变

（3）奥氏体冷却时的组织转变　奥氏体在临界温度 A_1 以下是不稳定的，它会发生转变，但并不是一到 A_1 温度以下立即发生转变，它要停留一定时间（孕育期）。此时，它处于不稳定状态，称为过冷奥氏体。过冷奥氏体在不同温度进行等温转变，会获得不同的组织和性能，见表 3-1。

感应加热随后快冷的实际情况是快速加热升温又快速连续冷却，使奥氏体在温度连续下降过程中发生转变，称为过冷奥氏体的连续冷却转变。图 3-3 所示为过冷奥氏体的等温转变图，从图上根据冷却速度曲线（v_1、v_2 等）与转变曲线相交的位置，可大致估计得到什么样的组织。

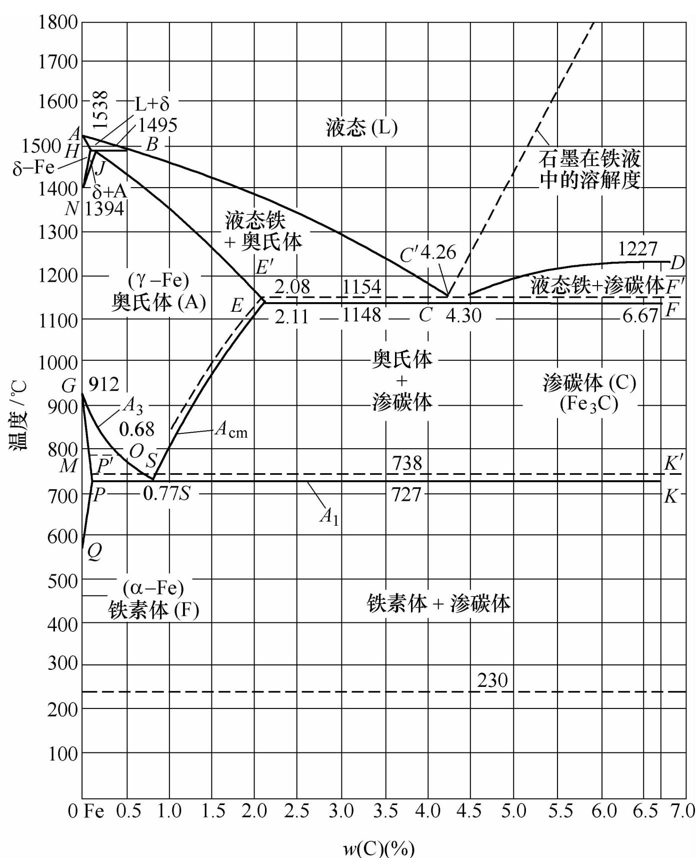


图 3-2　铁碳相图

表 3-1　过冷奥氏体等温转变产物的组织及硬度

组织名称	形成温度范围/℃	显微组织特征	硬度 HRC
珠光体	A_1 ~650	粗片状混合物	<25
索氏体	650 ~600	细片状混合物	25 ~35
托氏体	600 ~550	极细片状混合物	35 ~40
上贝氏体	550 ~350	羽毛状	40 ~45
下贝氏体	350 ~ *Ms*	黑色针状	45 ~55
马氏体	*Ms* 点以下	针状或板条状	50 ~66
低碳马氏体	*Ms* 点以下	板条状	45 ~50

冷却速度 v_1 相当于随炉冷却（10℃/min），它得到的产物是珠光体；v_2 相当于在空气中冷却（10℃/s），它得到的产物是索氏体；v_3 相当于在油中冷却（150℃/s），它与开始转变曲线相交，一部分过冷奥氏体分解为托氏体，但 v_3 没有与转变终了

线相交，故另一部分过冷奥氏体来不及分解就被过冷到 *Ms* 线以下，转变为马氏体，感应淬火中得到的过渡层既有马氏体，又有托氏体就是在这种冷速下形成的；v_4 相当于在水中冷却（600℃/s），它不与转变曲线相交，表明冷却快，过冷奥氏体来不及发生分解，便被过冷到 *Ms* 以下转变为马氏体，感应淬火时常用喷液淬火，其冷速比图中 v_4 快，即曲线更陡，往更左方向靠近。

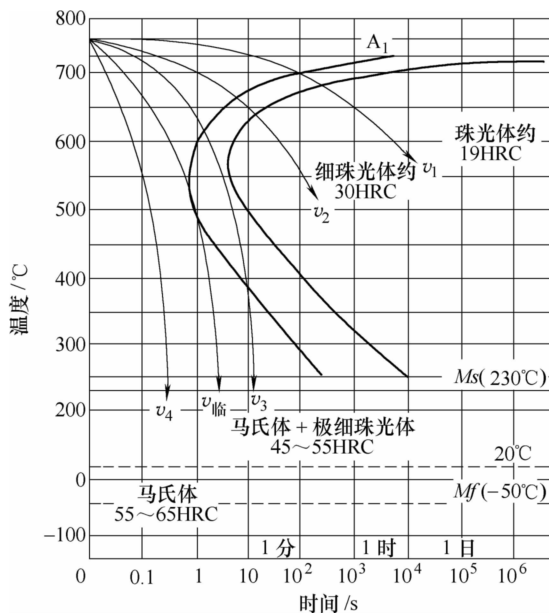


图 3-3　过冷奥氏体的等温转变图

69. 什么是奥氏体？

碳溶解在 γ-Fe 中所形成的间隙固溶体称为奥氏体。奥氏体的溶碳能力较强，在 1148℃时固溶度可达 2.11%，在 727℃时固溶度为 0.77%。奥氏体的强度和硬度不高，但具有良好的塑性，当钢处于奥氏体状态时，能顺利地进行压力加工。图 3-4 所示为奥氏体的显微组织。

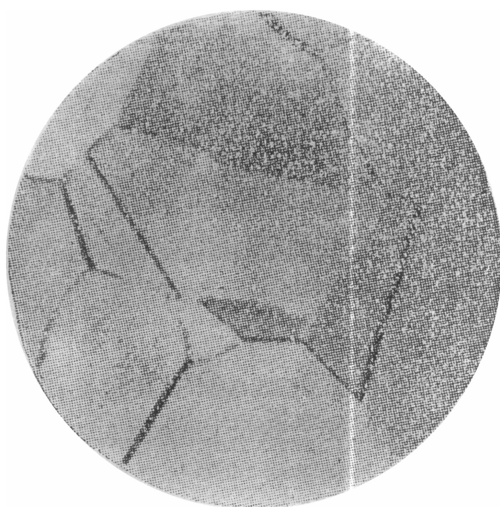


图 3-4　奥氏体的显微组织

70. 什么是铁素体？

碳溶解在 α-Fe 中形成的间隙固溶体称为铁素体。由于铁素体的碳含量极低［室温时 *w*（C）为

0.0008%]，所以铁素体的性能与纯铁相似，即具有良好的塑性和韧性，低的强度和硬度。图 3-5 所示为铁素体的显微组织。

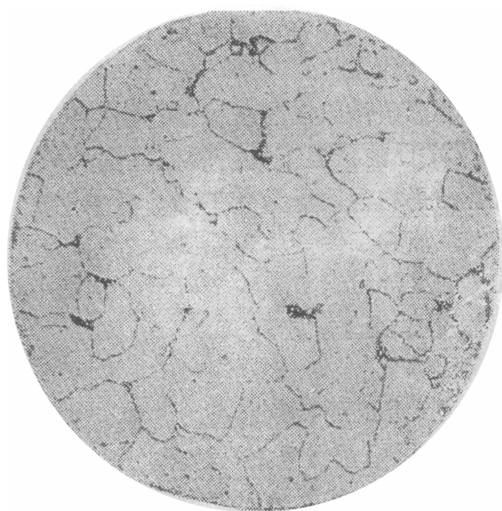


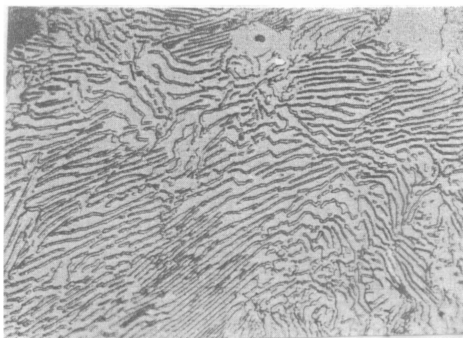
图 3-5　铁素体的显微组织

71. 什么是渗碳体？

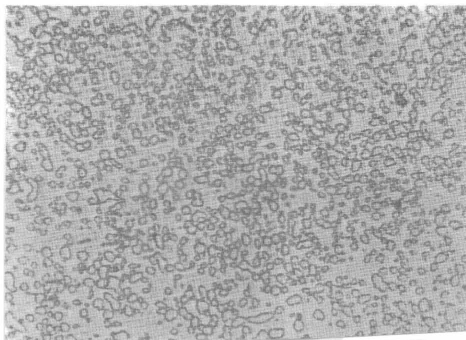
渗碳体是铁和碳的化合物，其分子式为 Fe_3C。碳在铁中的溶解能力有限，并随温度的降低而变化，多余的碳就会和铁按一定比例化合而形成 Fe_3C，渗碳体中 w（C）为 6.69%。它的硬度很高，约为 800HBW，脆性很大，而塑性及韧性几乎等于零。

72. 什么是珠光体？

铁素体和渗碳体的机械混合物称为珠光体。它是奥氏体在冷却过程中，在 727℃ 的恒温下发生共析转变而得的产物，它只存在于 727℃ 以下。珠光体中平均 w（C）为 0.77%。由于它是铁素体和渗碳体的机械混合物，所以它的力学性能介于铁素体与渗碳体之间。它的强度较高，硬度适中（粗片状珠光体的硬度 <25HRC），具有一定的塑性。其显微组织见图 3-6。



a)



b)

图 3-6　珠光体的显微组织

a）层状珠光体　b）粒状珠光体

73. 什么是莱氏体？

w（C）为 4.3% 的铁碳合金在 1148℃ 时，从液体中同时结晶出奥氏体和渗碳体的机械混合物称为莱氏体。由于奥氏体在 727℃ 转变为珠光体，所以在 727℃ 以下的莱氏体，由珠光体与渗碳体所组成。它的硬度很高，大于 700HBW，塑性很

差。莱氏体的显微组织见图 3-7。



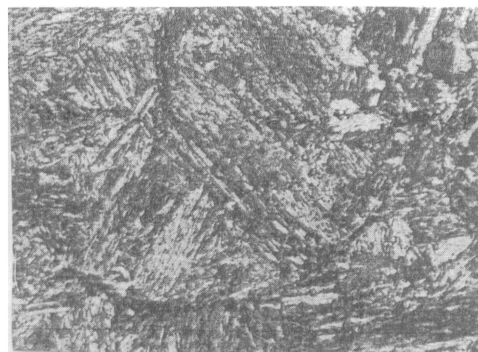
图 3-7　莱氏体的显微组织

74. 什么是马氏体？

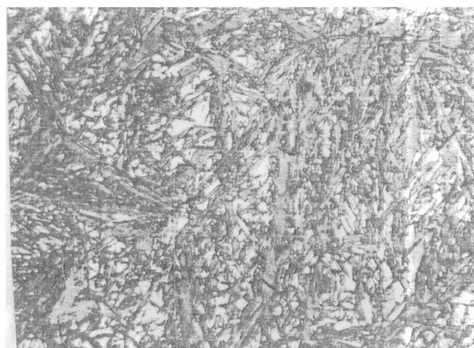
在铁碳合金中，马氏体是指碳在 α-Fe 中的过饱和固溶体。马氏体的形态因钢的碳含量、合金元素含量及马氏体形成温度的不同而异，最常见的是板条马氏体和片状马氏体。马氏体的显微组织见图 3-8。

75. 什么是临界冷却速度？

图 3-3 中 $v_{临}$ 恰好与开始转变曲线相切，是奥氏体不发生分解而全部过冷到 Ms 线以下向马氏体转变的最小冷却速度，称为临界冷却速度。



a)



b)

图 3-8　马氏体的显微组织
a）板条马氏体　b）片状马氏体

76. 什么是本质细晶粒钢？

不同成分的钢在加热时，奥氏体晶粒长大的倾向是不同的。一种是钢的奥氏体晶粒随温度的升高会迅速长大，这种钢称为本质粗晶粒钢；另一种钢的奥氏体晶粒则不易长大，只有加热到较高温度（930 ~ 950℃）时才急剧长大，这样的钢称为本质细晶粒钢。钢的本质晶粒示意图见图 3-9。

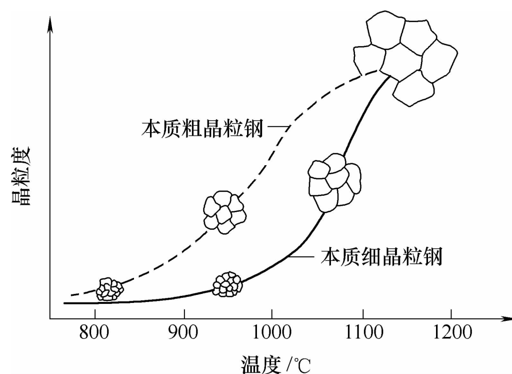


图 3-9　钢的本质晶粒示意图

77. 钢的晶粒度大小对力学性能有何影响?

晶粒度标准等级分为8级，1级最大，8级最小。奥氏体晶粒在100倍显微镜下，其大小与标准的晶粒度进行对比，凡晶粒度为1~5级的定为本质粗晶粒钢，5~8级的定为本质细晶粒钢。此外，还有超细晶粒钢。钢的奥氏体晶粒大小是在一定加热条件下形成的，称为奥氏体实际晶粒度，它的大小对冷却转变后钢的性能有明显的影响，奥氏体晶粒越细小，则淬火后的晶粒也越细，力学性能也越好，特别是对冲击韧度有明显的提高。因此，钢在淬火加热时，为得到细小而均匀的奥氏体晶粒，首先要选用本质细晶粒钢；其次，加热温度必须控制，不能过高。

78. 感应热处理常用钢牌号有哪些?

感应淬火最常用的钢号是 w（C）为0.4%~0.5%的优质碳素结构钢。近年来，由于工艺的改进，钢号范围在不断扩大，按碳量划分可分为以下五个组别：

（1）0.15%~0.30%组　主要用于冷冲压和焊接承载系统的零件，如汽车后桥壳、车架纵梁等。

（2）0.40%~0.50%组　主要用于在大的疲劳载荷下进行工作或受重载荷的轴和其他零件，如曲轴、凸轮轴、驱动轴等，由于碳含量适中、能得到高硬度，又不易淬裂，因此45钢得到最广泛的应用。

（3）0.55%~0.65%组　主要用于在疲劳载荷和接触载荷带磨损条件下工作、承受重载荷的零件，如齿轮、花键轴、十字轴、钟形壳等。

（4）0.95%~1.05%组　主要用于需感应穿透淬火或表面淬火的滚动轴承零件。

（5）1.10%~1.20%组　主要用于对耐磨性要求特别高的零件等。

表3-2列出了感应淬火及回火工件的常用材料。

表3-2　感应淬火及回火工件的常用材料

类　别	牌　号
优质碳素结构钢（GB/T 699—1999）	25、30、35、40、50、55、60 25Mn、30Mn、35Mn、40Mn、45Mn、50Mn、60Mn、70Mn
保证淬透性结构钢（GB/T 5216—2004）	45H、15CrH、20CrH、20Cr1H、40CrH、45CrH、16CrMnH、20CrMnH、15CrMnBH、17CrMnBH、40MnBH、45MnBH、20MnVBH、20MnTiBH、15CrMoH、20CrMoH、22CrMoH、42CrMoH、20CrMnMoH、20CrMnTiH、20CrNi3H、12Cr2Ni4H、20CrNiMoH、20CrNi2MoH
合金结构钢（GB/T 3077—1999）	15Cr、20Cr、45Cr、15CrMn、20CrMn、20CrMnTi、20CrNi3、12Cr2Ni4、20CrNiMo、30Mn2、35Mn2、40Mn2、45Mn2、50Mn2、20MnV、27SiMn、35SiMn、42SiMn、40B、45B、50B、40MnB、45MnB、40MnVB 20CrMo、20CrMnMo 30Cr、35Cr、40Cr、50Cr、38CrSi、30CrMo、35CrMo、42CrMo、40CrV、40CrMn、25CrMnSi、30CrMnSi、35CrMnSiA、40CrMnMo、40CrNi、45CrNi、50CrNi、40CrNiMoA

（续）

类　　别	牌　　号
弹簧钢（GB/T 1222—2007）	65、70、85、65Mn、55SiMnVB、60Si2Mn、60Si2MnA、60Si2CrA、60Si2CrVA、55CrMnA、60CrMnA、50CrVA、60CrMnBA
高碳铬轴承钢（GB/T 18254—2002）	GCr4、GCr15、GCr15SiMn、GCr15SiMo、9Cr18Mo
碳素工具钢（GB/T 1298—2008）	T7、T8、T8Mn、T9、T10、T11、T12、T13
合金工具钢（GB/T 1299—2000）	9Mn2V、CrWMn、9CrWMn、5CrMnMo、5CrNiMo
锻造合金钢冷轧工作辊用钢（GB/T 13314—2008）	8Cr2MoV、8Cr3MoV、8Cr5MoV、9Cr2、9Cr2Mo、9Cr3Mo、9Cr2MoV
锻造合金钢支承辊用钢（JB/T4120—2008）	45Cr4NiMoV、50Cr5MoV、40Cr3MoV、9Cr2Mo、70Cr3NiMo、70Cr3Mo、55Cr、35CrMo
不锈钢棒（GB/T 1220—2007）	20Cr13、30Cr13、32Cr13Mo
耐热钢棒（GB/T 1221—2007）	42Cr9Si2、40Cr10Si2Mo、80Cr20Si2Ni
一般工程用铸造碳钢（GB/T 11352—2009）	ZG230-450、ZG270-500、ZG310-570、ZG340-640
灰铸铁（GB/T 9439—2010）	HT200、HT250、HT300、HT350
珠光体可锻铸铁（GB/T 9440—2010）	KTZ450-06、KTZ550-04、KTZ650-02、KTZ700-02
球墨铸铁（GB/T 1348—2009）	QT400-18、QT400-15、QT450-10、QT500-7、QT600-3、QT700-2、QT800-2、QT900-2
粉末冶金铁基结构材料	FTG30、FTG60、FTG90、FTG70Cu3、FTG60Cu3Mo

注：1. 保证淬透性结构钢及各种合金钢铸件参照表中所示牌号或化学成分，相当者可选用。

2. 渗碳钢（牌号参照 JB/T3999）经渗碳后采用感应淬火回火处理时，也适用本标准有关内容。

3. 必要时可提出特殊要求。

79. 感应淬火对钢有哪些要求？

对感应淬火用钢一般有以下要求：

1）钢的碳含量由零件的工作条件确定，可由 w（C）为 0.15% ~1.2%，这是最基本的要求。

2）钢应具有奥氏体晶粒不易长大的倾向，选用本质细晶粒钢。

3）钢应尽可能具有细的、分散的原始组织。以上 2）、3）两项条件使钢在加热时可获得奥氏体细晶粒和较高的晶粒长大温度，这在感应加热时特别重要，因为感应加热比炉内加热温度高，更难于准确地控制温度规范。

目前，一般感应淬火用钢，晶粒度控制在 5 ~8 级。

感应淬火对钢的预备热处理有要求，同一钢材，预备热处理为调质时，由于索氏体是很细的组织，奥氏体转变均匀化最快，所需加热温度最低，得到的硬度最高，可以获得最浅的淬硬层深度。当预备热处理为正火时，细片状珠光体转变为奥氏体需要较高的温度；当原始组织为粗片状珠光体及大块铁素体时（亚共析钢退火状态），则需要更高的加热温度。即便如此，由于加热时间短，淬火组织中仍会有未溶解的铁素体存在。

感应淬火时，钢材的淬透性仍然起着作用，同样加热层深时，组织越细，淬透性越差，钢中含的合金元素，如 Mn（锰）、Cr（铬）、Ni（镍）、Mo（钼）等对钢的淬透性有一定影响。

4）精选碳含量，对一些重要零件如曲轴、凸轮轴等，在选择钢号时，常提出精选碳含量的附加要求，精选碳含量将优质碳钢碳含量的上、下限差从 0.08%（如 0.42% ~0.50%）缩小为 0.05% 范围（如 0.42% ~0.47%），这样可以减少由于碳含量波动对产生裂纹或层深变化的影响。

笔者曾分析过几种不同货源的 45 钢，用于曲轴颈感应淬火，发现在相同工艺规范情况下，层深有很大差异，其原因与材料的 Mn 及杂质中 Cr、Ni 含量有关。此外，国外钢材的杂质元素中，Cr、Ni 含量常较国产钢材为高，因此，淬火结果常有差异，此点必须注意。

5）冷拔钢的脱碳层深度要求。冷拔钢用于感应淬火时，对表面总脱碳层深度有要求，一般规定每边的总脱碳层深度应小于 1% 棒料直径或钢板厚度。贫碳层淬火后硬度很低，因此冷拔钢必须磨去贫碳层后再检验淬火硬度。

80. 钢中诸元素对钢感应淬火各有何种作用?

（1）碳（C）　碳决定钢淬火后可达到的硬度，碳含量高，淬火硬度高，但易淬裂。一般选用 w（C）为 0.30% ~0.50%，这样得到的硬度值约 50 ~60HRC。硬度值的上限受碳含量的制约。实践证明，这一碳含量约为 0.50%。较高的碳含量有时也应用，例如轧辊用 w（C）0.80%、w（Cr）1.8% 和 w（Mo）0.25% 的钢制造。不含合金元素的碳钢，由于要求高的冷却速度，因此变形大，开裂的倾向也大，此外淬透性也差。

（2）硅（Si）　钢中的硅除提高强度和淬透性以外，在炼钢时还能去除钢中的气体，起镇静作用。

（3）锰（Mn）　钢中的锰提高钢的淬透性，并且降低临界冷却速度，锰在加热时在铁素体中形成固溶体，能提高钢的强度。锰钢常用在淬硬层深度大于 4mm 的情况下。由于它降低了临界冷却速度，因此在冷却规范不太稳定的条件下，能得到均匀的淬火硬度。

（4）铬（Cr）　钢中的铬由于能形成碳化物，因而需要提高加热温度和延长加热时间，对感应淬火有不利的一面。但铬提高了钢的淬透性（与锰相似），铬钢

在调质状态下具有较高的力学性能。因此，40Cr、45Cr 常用于制造重负荷的齿轮及花键轴。感应淬火钢中的 w（Cr）一般不超过 1.5%，最高不超过 2%。特殊情况下，w（Cr）在 17% 以下也可感应淬火，但需很高的加热温度，加热温度在 1200℃以下，此时碳化物很快溶解，才可以充分淬火。

（5）钼（Mo）　钢中的钼能提高淬透性，钼在钢中的含量很少。

（6）硫（S）　钢中的硫，会形成硫化物，试验证明，硫的含量减低时，伸长率和断面收缩率得到改善，冲击韧度值增加。

（7）磷（P）　钢中的磷，不形成磷化物，但易造成严重偏析，因此是有害元素。

81. 钢的不同原始组织对感应淬火有何影响？

铁素体及渗碳体转变为奥氏体的速度取决于温度、钢的成分及原始组织。

产生奥氏体新相中心的生成速度及这些中心长大的速度是取决于原始组织的，原始组织越弥散，铁素体及渗碳体质点间距离越小，因此加热时奥氏体晶核的产生和长大速度也越快。由于铁素体-渗碳体混合物形成奥氏体是在这些相的分割面边界上进行的，原始组织越细，则相的分割面（反应有效面）也越大。原始组织越弥散，固溶体加热时所需成分均匀的时间也越短。因此，原始组织状态对感应淬火是十分重要的。

亚共析钢在正火或退火状态，其原始组织为珠光体及自由铁素体，它奥氏体化的速度比调质状态索氏体（弥散的铁素体渗碳体混合物）慢得多，正火或退火钢要得到完全淬火应比调质钢提高淬火温度。

含碳质量分数为 0.5%、不同原始组织的钢要得到高硬度，所需加热温度与加热持续时间是不同的，如图 3-10 所示，曲线 1 为退火状态，曲线 2 为调质状态。

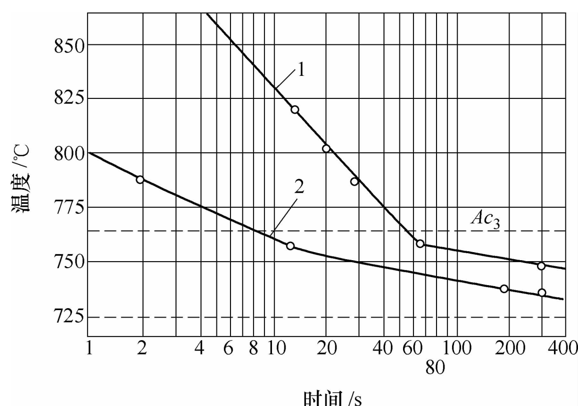


图 3-10　不同原始组织的 w（C）为 0.5% 钢获得高硬度的温度与加热持续时间

1—退火　2—调质

获得索氏体组织的另一作用是防止钢在感应淬火时产生很大的残留应力。如众所周知，淬火钢中残留应力的大小，除其他因素外，也取决于淬火温度。淬火温度越高，则淬火钢中的残留应力也越大。调质组织所需的淬火温度最低，因此，淬火后残留应力也最小，减少了淬裂、剥落的危险性。调质处理由于能提高心部强度，因此对重要的、要求较高力学性能的零件，更是必要的。

82. 为什么说钢中存在带状组织不适于感应淬火？

感应淬火工件一般用中碳钢制造，中碳钢淬火中有时会碰到“带状组织”问题。所谓带状组织是一种原始显微组织的缺陷，它的铁素体呈带状分布，见图 3-11a。在感应加热时，呈带状组织的铁素体不易溶入奥氏体中，即使用最佳感应加热规范，淬火后在马氏体视野旁仍可看到残留的带状铁素体（见图 3-11b），淬火后硬度不均匀，有效硬化层下降，从而使工件的力学性能（硬度、耐磨性、接触疲劳强度等）下降。

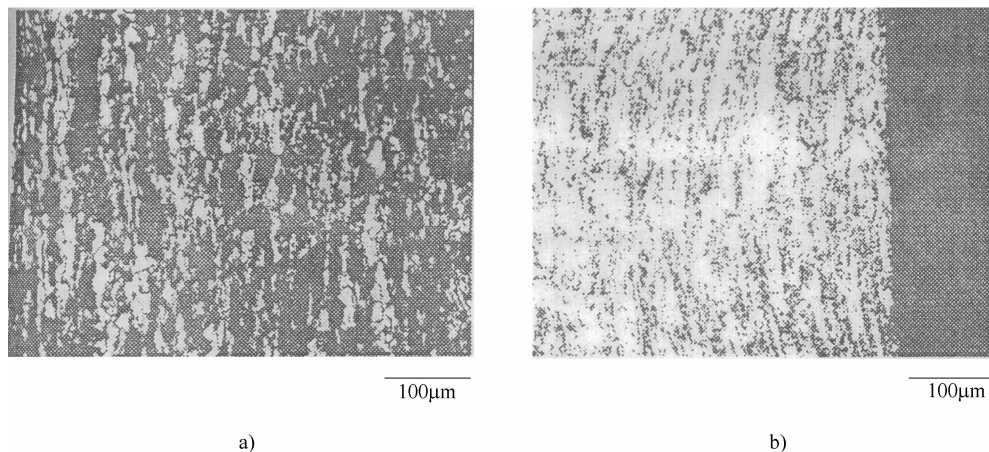


图 3-11　45 钢中的带状组织

a）原始显微组织　b）硬化层表面的残留铁素体

带状组织可以用预先正火来得到改善，但不能完全消除。另外，也可以提高工件的感应加热温度来改善，但这会导致工件心部硬度增高和马氏体粗大。

83. 感应热处理有哪些金属学的特点？

感应热处理与常规的炉中加热淬火有以下不同特点。

1）快速加热使 Ac_1、Ac_3 临界点升高。感应加热零件升温速度从每秒几十度到每秒几百度，脉冲淬火更达到每秒几千度（2000～3000℃/s）。由于加热速度快，持续时间短，因此淬火温度比一般淬火温度要高，才能使组织转变为奥氏体并均匀化。表 3-3 示出了 T10 与 GCr15 钢快速加热时临界点 Ac_1 随加热速度加快而升高的有关数据。

表 3-3　电加热速度与临界点 Ac_1 的关系　（单位：℃）

钢号	原始状态	加热速度/（℃/s）					
		10	50	100	150	200	300
T10	退火	745	760	765	760	765	765
	淬火	735	745	755	755	760	765
GCr15	退火	770	810	825	830	835	810
	淬火	740	750	785	800	815	830

图 3-12 示出了各种不同原始组织的 T8 钢临界点与加热速度的关系。图中 a_0 的物理意义：对珠光体，它表示相邻两个渗碳体间距离的一半；对自由铁素体，它表示位错网节点间距离的一半。

快速感应加热时，Ac_3 的位置也是随加热速度的升高而升高的，图 3-13 示出了亚共析碳钢在不同加热速度下得到完全淬火所需的温度。

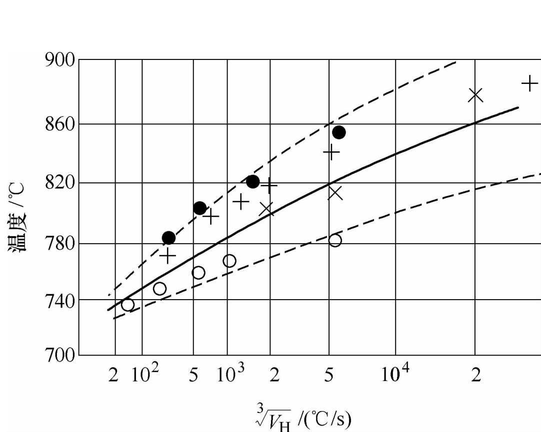


图 3-12　不同原始组织的 T8 钢临界点与加热速度的关系

○—淬火钢（$2a_0=0.2\mu m$）

×—正火钢（$2a_0=0.3\mu m$）

●—退火钢，粒状珠光体（$2a_0=1\mu m$）

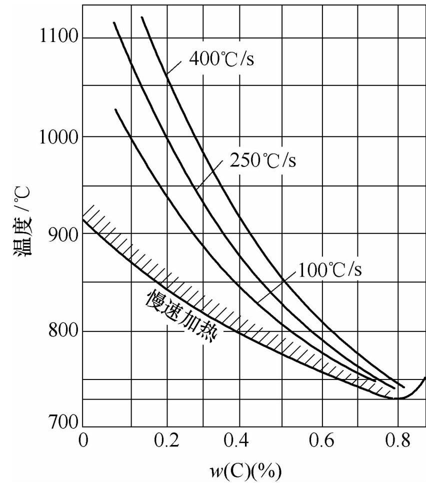


图 3-13　亚共析碳钢在不同加热速度下得到完全淬火的温度

2）快速加热能使钢得到细的晶粒或超细化晶粒。淬火和低温回火后的钢，在马氏体组织中仍然保留着加热时的奥氏体晶界，因而可在淬火后用金相方法对加热状态下奥氏体晶粒大小和晶粒长大的动力学进行研究。

试验证明，对具有均匀分布的铁素体和渗碳体组织（如共析钢和过共析钢的退火、正火后得到的细片状组织或调质组织；亚共析钢的淬火或调质组织）的钢

进行快速加热时，当加热速度从 0.02℃/s 提高到 100～1000℃/s 时，初始奥氏体晶粒度（完成 α→γ 转变时奥氏体的晶粒大小）就由 8～9 级细化到 13～15 级。加热速度为 10℃/s 左右时，初始奥氏体晶粒度为 11～12 级。因此可以认为，加热速度越大，初始奥氏体晶粒就越细。有关试验数据表明，14～15 级的“超细化晶粒”是在 100～1000℃/s 这样高的加热速度下得到的。表 3-4 列出了 45、55Tid 钢转变终了温度（t℃）与初始奥氏体晶粒等级的关系。

表 3-4　45、55Tid 钢转变终了温度（t℃）与初始奥氏体晶粒等级的关系

钢牌号	加热速度/（℃/s）	正火原始组织			淬火原始组织			调质原始组织		
		t/℃	S/μm^2	晶粒等级	t/℃	S/μm^2	晶粒等级	t/℃	S/μm^2	晶粒等级
45	10	830	30	12	790	30	12	800	20	12
	1000	950	25	12～13	800	6	14～15	820	5	14～15
55Tid	10	830	30	12	790	25	12～13	800	25	12
	1000	930	25	12～13	800	6	14～15	820	5	14～15

图 3-14 示出了细晶粒钢 55Tid 的奥氏体晶粒尺寸与温度和加热速度的关系。从这个图表中可看出，加热速度越快，所得奥氏体晶粒越细；加热终了温度越高，所得奥氏体晶粒越粗。

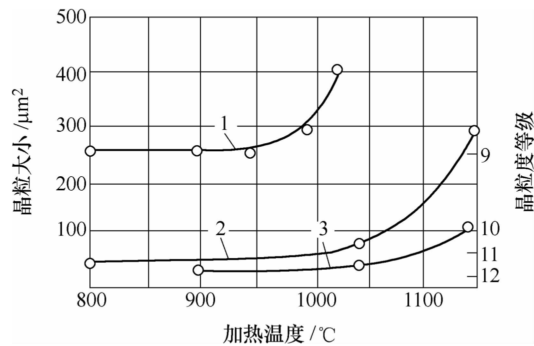


图 3-14　55Tid 钢的奥氏体晶粒尺寸与加热温度和速度的关系

1—v=0.02℃/s　2—v=10℃/s　3—v=1000℃/s

用快速感应加热，并通过多次循环加热与冷却，可以得到 15 级的超细化晶粒，是一种有前途的超细化处理方法。

84. 感应加热时，零件截面上的温度是怎样分布的?

感应加热时，如果是透入式加热（即涡流直接加热，不借助热传导），零件截面上的温度分布如图 3-15 所示。

图上曲线“t”是零件截面上的温度分布曲线，零件外表面温度最高，心部温

度逐渐降低，此斜率随所施加的功率密度大小而变。功率密度愈大，此斜率越陡，反之，越平坦。从“t”曲线可看出，零件表面温度略高于 Ac_3 而为 880℃，“Ⅰ”区温度高于 Ac_3，得到完全淬火的马氏体，为淬硬区；“Ⅱ”区温度高于 Ac_1，但低于 Ac_3 奥氏体化未全部完成，剩下部分铁素体未溶解，得到的是马氏体与铁素体，铁素体边沿常有黑色托氏体，马氏体则无针状特征，此区为过渡区；“Ⅲ”区温度低于 Ac_1，此区组织没有转变，仍为原始组织——珠光体与铁素体。

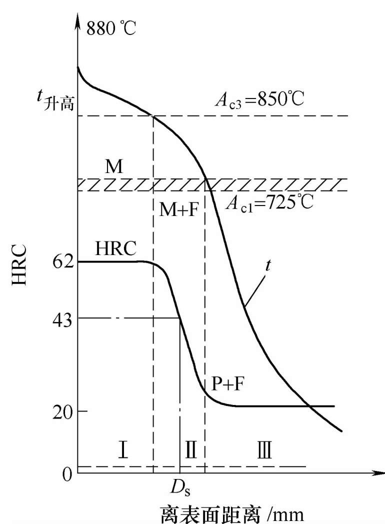


图 3-15　45 钢淬硬层内温度、硬度与组织的分布

t—温度分布曲线　D_s—淬硬层深度　HRC—硬度分布曲线　区Ⅰ—加热温度高于 A_3，淬火后得马氏体　区Ⅱ—加热温度在 A_1 与 A_3 之间，淬火后得马氏体与铁素体　区Ⅲ—未转变，保持珠光体与铁素体

从图 3-15 的 HRC 硬度分布曲线，可看出马氏体区硬度高达 62HRC，过渡区硬度变化很大，从 62HRC 降到钢的原始组织硬度。图上从表面到 D_s 这一段为有效硬化层深度，45 钢用金相法测量到 50%（面积分数）马氏体处，其硬度为 43HRC。

85. 钢感应淬火温度应怎样选择?

各种钢均有一个淬火最佳温度区，比这一区温度高，会出现过热组织；比这一区温度低，则显得加热不足。前已述及，随着加热速度的加快，这个最佳温度区的温度也在提高，这是因为 Ac_1、Ac_3 提高的影响。图 3-16 列举了 45 钢最佳淬火规范的图表。图中Ⅱ区是最佳规范区，Ⅰ与Ⅲ区是允许规范区，超过以上区域则会呈现明显加热不足或过热，应在制订工艺规范时避免。

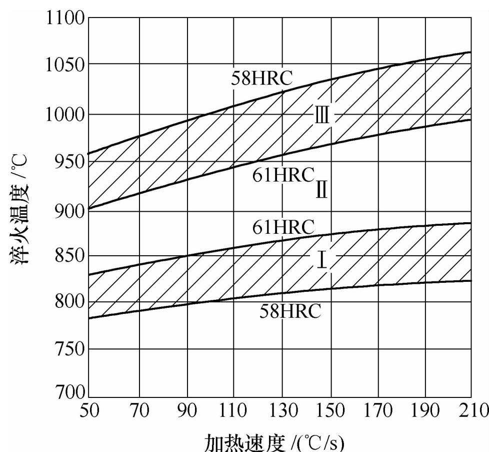


图 3-16　正火 45 钢最佳规范图表

Ⅱ区—最佳规范区

Ⅰ区、Ⅲ区—允许规范区

86. 感应淬火时，零件上的应力有哪些? 怎样分布?

表面淬火零件在淬火过程中产生的应力是热应力与组织应力共同造成的，热应力所引起的残留应力，一般是不大的（表面的残留压应力约为 98～147MPa，内部的残留拉应力大小也大致相近）。许多研究已证明，钢零件

感应淬火后，淬硬层内有残留压应力存在，在表面处，其值可达到686～784MPa，一般压应力离表面越远时越小。当深度超过淬硬层后，残留应力转变为拉应力，如图3-17所示。

表面淬火后的残留压应力使试样或零件的疲劳强度得到提高；相反，残留拉应力则是有害的。当拉应力达到一定值时，能使零件产生裂纹。

关于淬硬部位边界上的硬度和残留应力，试验结果可从图3-17看出，在淬硬区范围内表面残留压应力等于539～588MPa，靠近淬硬层边界的压应力降低，并转变为拉应力，拉应力最大值处在离淬硬区边缘10mm的地方，其最大值达到147MPa。

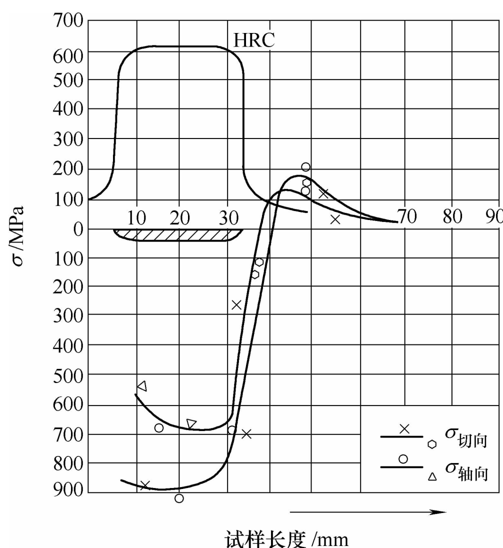


图3-17　在淬硬区边界上的硬度和残留应力（45钢）

试验还得出以下关系，随着淬硬层总深度增加，亦即加热深度增大和加热速度的降低，淬硬区中心的最大压应力增加，淬硬区附近的拉应力减少。

87. 钢件感应淬火后的表面硬度为什么比普通淬火的高？

钢件感应淬火后的表面硬度比普通淬火高，这是钢感应淬火的特点，有时称之为超硬现象。其机理有多种解释：一种解释是感应加热时间短，缺乏奥氏体晶粒长大的条件，造成淬火钢的细晶粒；另一种解释是感应淬火时冷却速度特高，在淬火表面层中存在很大的残留压应力。因此，提高了表面硬度。

把经过高频感应淬火的方钢切断，再与切断前的硬度相比，切断后的硬度平均降低2HRC以上，证明了残留压应力去除后硬度会降低。另一种可解释残留压应力导致表面硬度增高的论据是：感应淬火钢在低温回火时，其硬度下降比普通淬火的多。

88. 感应淬火常见加热方法有哪几种？如何选用？

由于加热零件的形状不同，淬硬区面积不同，必须采用多种相适应的工艺来操作，原则上分为两大类：

（1）同时加热淬火　将整个淬硬区同时加热，停止加热后同时进行冷却，在加热过程中零件和感应器的相对位置不变。同时加热法在应用中又可分为零件旋转或不旋转，冷却方式又可分为落入喷水器中或感应器喷液两种。从提高发电机利用系数角度出发（一台发电机供应多台淬火机除外），同时加热后零件落入喷水器中，生产率及发电机利用系数均比感应器喷液方式为高。

（2）扫描淬火　常简称连续淬火。此法只是将需淬火区域中的一部分进行同时加热，通过感应器与加热零件间的相对运动，把加热区逐步移到冷却位置。扫描淬火也可分为零件不转（如机床导轨淬火）和旋转（如圆柱形长轴）两种。此外，还有扫描圆周淬火，如大凸轮的外圆轮廓淬火；扫描平面淬火，如平圆锉板表面淬火，也是属于扫描淬火的范畴。扫描淬火适用于需加热大的表面面积而电源设备功率不够的情况。大量生产经验表明，同时加热法在电源功率相同情况下，零件生产率比扫描淬火法为高，淬火设备占地面积则相应减少。对于有阶梯的轴类零件，扫描淬火时，从大直径到小直径阶梯处由于感应器电磁场偏移，常有一段加热不足的过渡区，使淬硬层在轴的全长上不连续。现在，国内已普遍采用纵向电流同时加热法，使阶梯轴在全长上的淬硬层保持连续，使轴的扭转强度得到提高。

89. 有哪几类铸铁可以进行感应淬火？

灰铸铁、球墨铸铁、可锻铸铁、合金铸铁均能进行感应淬火。例如，机床导轨、发动机气缸套、气缸盖等是由灰铸铁制成的；发动机曲轴有相当数量是由球墨铸铁所制；汽车制动蹄片则由铁素体可锻铸铁制成，汽车凸轮轴由合金铸铁制造。这些零件都可进行感应淬火，以提高表面耐磨性。

（1）灰铸铁　常用于感应淬火的灰铸铁是珠光体基体型。由于铸铁的化学成分与铸件组织有直接关系，硫、磷含量对淬火质量也有影响，因此铸铁淬火出现质量问题，常首先查铸铁成分与淬火前的组织状态。

1）铸铁各种元素的作用：铸铁成分中，碳与硅含量应严格控制，碳含量高时，石墨化易于进行。由于硅对铸铁石墨化影响强烈，因此常控制 C + Si 之和。C + Si 之和愈大，石墨析出愈多并且粗大，使基体组织中铁素体增多。从表 3-5 中可看出，随着 C + Si 值增大，灰铸铁淬火后平均硬度（石墨与马氏体）降低。

表 3-5　灰铸铁感应淬火时碳当量对表面硬度的影响

化学成分（质量分数，%）①		碳当量②	洛氏硬度　HRC		
C	Si		读出	洛氏 30N	显微硬度
3.13	1.50	3.63	50	50	61
3.14	1.68	3.70	49	50	57
3.19	1.64	3.74	48	50	61
3.34	1.59	3.87	47	49	58
3.42	1.80	4.02	46	47	61
3.46	2.00	4.13	43	45	59
3.52	2.14	4.23	36	38	61

① 铸铁中均含质量分数为 Mn0.50 ~ 0.90、Ni0.35 ~ 0.55、Cr0.08 ~ 0.15 及 Mo0.15 ~ 0.30。

② 碳当量 = %C + 1/3（%Si）。

锰与硅不同，它阻止石墨化，促进铸铁白口化；硫减低铁液流动性并促进铸铁白口化。因此，对小铸件，w（S）<0.08%，大铸件 w（S）允许<0.12%。磷改善了铁液流动性，但磷化铁在铁液凝固时会与奥氏体、渗碳体组成三元磷共晶[Fe_γ（C，P）+Fe_3C+Fe_3P]。这个共晶体的熔点处于淬火温度范围（约950℃），因此会在淬火表面产生微小的熔化点。w（P）应<0.1%，最大不超过0.15%。对于铬、锰、钨、钼、钒这些能溶于渗碳体的元素，都阻止铸铁石墨化。而不溶于渗碳体的元素均促进铸铁石墨化。加镍一般是有害的，镍促进马氏体形成，导致很大的内应力，易产生裂纹；钼同样增加灰铸铁的淬硬性，但不易产生裂纹。

2）灰铸铁淬火前的组织：灰铸铁淬火前主要控制石墨粗细、铁素体含量、珠光体粗细与磷共晶和渗碳体。拖拉机发动机气缸套（珠光体基体灰铸铁）铸态组织的合格标准见表3-6。

表3-6　气缸套铸态组织合格要求

组织	合格要求	不合格时
石墨	呈细片状或中片状和直线状，分布均匀	呈粗片状、直角形、螺旋涡状、块状
铁素体	面积<10%	25%，30%
珠光体	呈薄片状或中片状	粗片状、中等夹杂和间断网状
磷共晶	呈单个夹杂	呈间断状或间断网状
渗碳体	无	呈单个夹杂或莱氏体分布段状

3）灰铸铁与钢的区别在于含有石墨，因此，珠光体基体灰铸铁可视为带有许多孔隙（石墨）、含有Si、Mn合金元素的低合金钢。

此外，珠光体灰铸铁中，珠光体基体的最小含碳（化合碳）质量分数为0.4%，最好为0.6%~0.8%。

（2）球墨铸铁　铸态金相组织对球化率、碳化物、磷共晶、珠光体形态、铁素体量等也均有具体规定。

（3）可锻铸铁　当进行铁素体可锻铸铁感应淬火时，为了使石墨碳能溶解在奥氏体中，加热速度应减慢，并应提高淬火温度，才能淬硬。

（4）合金铸铁　合金元素Cr、Ni等的加入，有利于提高奥氏体的稳定性可以在较低临界冷速下进行淬火。

90. 铸铁感应淬火时应注意哪些方面？

各种铸铁中，灰铸铁的感应淬火难度最大。灰铸铁感应淬火与钢相似，所用淬火设备也相似，应注意以下不同点：

1）加热时间比钢件为长，一般应在几秒以上，并应保温一段时间，使难溶的组织溶入奥氏体，加热速度过快会导致过高的热应力，易产生裂纹。

2）加热温度不能太高，上限为950℃，一般在900~930℃，不同牌号有一个

最佳温度，加热温度达 950℃时，零件表面会出现磷共晶，还会有粗大的残留奥氏体。

3）为使温度由表面缓慢过渡到心部，最好不要在加热后立即淬火，预冷 0.5 ~2.0s 最好。

4）铸铁件感应淬火一般采用聚合物水溶液或油作为淬火冷却介质，也有一些件如缸套直接用水作淬火冷却介质，更有缸体阀座采用自冷淬火。

5）灰铸铁件感应淬火后，为消除应力应进行低温回火，例如缸套采用工频回火，220℃ ×1h。

铁素体可锻铸铁的基体是铁素体与石墨碳，为使奥氏体中溶入碳，既要提高加热温度（达 1050℃），又要延长加热时间（达 1min 以上），这样才能使小部分石墨碳溶于奥氏体中，淬火后才能获得较高的表面硬度。

91. 感应淬火常用淬火冷却介质有哪些？应如何选用？

感应淬火常用淬火冷却介质有水、油及水溶性淬火冷却介质等。水适用于碳钢，对 40Cr 等中碳合金结构钢过去曾用质量分数为 5% ~15% 乳化液作淬火冷却介质。20 世纪 60 年代以来，上述介质已被新发展的水溶性淬火冷却介质所取代，浸油淬火或埋油淬火在感应淬火易裂零件生产中仍有应用，从发展角度看，水溶性淬火冷却介质将逐步取代油。

（1）水　感应淬火最常用的淬火冷却介质，水的冷却速度随水温、水压（流速）的变化而变化。一般工艺规定水温范围为 15 ~30℃，当零件采用自回火工艺时，水温范围缩小为 15 ~25℃。

一定截面喷出液的流量随压力（或流速）而变，为此工艺上一般规定淬火水的压力，亦即规定了淬火液的流量。对于单位表面积上所得到的流量称为喷淋密度。对于一般碳钢表面淬火，此值在 10 ~40mL/（cm^2·s）。随加热深度增加，喷淋密度值亦增大，对低淬透性钢淬火时要求激冷，此值可以再增大到 100mL/（cm^2·s）左右。控制喷淋密度，工艺上过去一般用淬火水压力来表示，常用 0.1 ~0.4MPa。近年来，随着控制仪表的进步，先进的淬火机床上已采用流量计来直接指示，将流量除以喷淋面积，即得到喷淋密度值。ϕ28mm 工业纯铁试样在不同加热规范和喷射冷却强度时，在不同温度区域内的冷却速度见表 3-7。流水冷却速度见表 3-8。

表 3-7　不同加热规范和喷射冷却强度时，在不同温度区域的冷却速度

加热规范	喷射冷却强度/（m/s）	平均冷却速度/（℃/s）			
		700 ~200℃	700 ~500℃	300 ~200℃	200 ~150℃
960℃，40s	8.7	1660	17000	385	110
	3.8	1500	1920	640	70
	1.4	1100	1100	1000	50

（续）

加热规范	喷射冷却强度/（m/s）	平均冷却速度/（℃/s）			
		700～200℃	700～500℃	300～200℃	200～150℃
820℃，40s	8.7	3200	20000	850	460
	3.8	2600	5700	950	540
	1.4	1100	1100	1260	430
820℃，4s	8.7	4200	12300	1250	130
	3.8	3600	6700	1300	90
	1.4	2300	2100	1670	80
1100℃，40s	1.0	270	470	165	25

表 3-8　淬火冷却介质在不同温度区域的冷却能力

序号	淬火冷却介质（喷射压力）	冷却速度/（℃/s）		附注
		600℃时	250℃时	
1	水，15℃，0.7MPa	1400	2270	马氏体区冷速高
2	水，15℃，0.5MPa	1600	2030	马氏体区冷速高
3	水，15℃，0.4MPa	1450	1900	马氏体区冷速高
4	水，15℃，0.3MPa	1270	1750	马氏体区冷速高
5	水+10% NaCl，40℃，0.4MPa	3250	1400	马氏体区冷速高
6	水+30%甘油，15℃，0.4MPa	1130	1400	马氏体区冷速高
7	水+30%甘油，15℃，0.4MPa	800	1250	马氏体区冷速高
8	水+20%甘油，15℃，0.4MPa	2370	1180	马氏体区冷速高
9	水+0.025% PVA，15℃，0.4MPa	1250	1000	马氏体区冷速高
10	水，15℃，0.2MPa	610	860	马氏体区冷速高
11	水，15℃，浸入	180	560	马氏体区冷速高
12	水+10% NaCl，15℃，0.4MPa	2160	430	马氏体区冷速高
13	水，20℃，0.4MPa	1110	410	马氏体区冷速低
14	水，30℃，0.4MPa	890	330	马氏体区冷速低
15	水+0.3% PVA，15℃，0.4MPa	900	320	马氏体区冷速低
16	水，40℃，0.4MPa	650	270	马氏体区冷速低
17	水+0.1% PVA，15℃，0.4MPa	800	240	马氏体区冷速低
18	水，60℃，0.5MPa	510	210	马氏体区冷速低
19	水+0.05% PVA，15℃，0.4MPa	730	55	马氏体区冷速低
20	浸油	65	10	马氏体区冷速低

注：1. 除序号 11 与 20 外，均是喷射冷却。

2. PVA 代表聚乙烯醇。

表 3-8 中的顺序是按马氏体区冷却速度由高到低排列的，因为中碳钢在淬火时，要求在 600℃区段快冷，则奥氏体不会分解，而在 250℃马氏体区段要求缓冷，则残留应力小，零件不易淬裂。序号 13、14、与 15 均是性能较好的淬火冷却介质，它符合 600℃时冷速高，250℃时冷速低的要求；从表中也可看出喷射冷却时，冷速随压力增高而增大。它与浸入冷却的冷速相差极大。水淬、油冷这个古老工艺的实质，也就是在 600℃区段快冷，而在 250℃区段缓冷。

（2）淬火油及喷油淬火　感应淬火时所用的淬火油与一般热处理淬火油可以通用。当采用油循环系统时，也可作为系统中的一个油槽，常用油温为 40～80℃。当采用喷油淬火时，喷油量一定要大到淬火零件不产生燃烧火焰为度。喷油压力为 0.2～0.6MPa。

（3）水溶性淬火冷却介质　水溶性淬火冷却介质由于淬火后零件不需清洗及无火灾危险性而成为淬火油的代用品。水溶性淬火冷却介质就其加入溶质的不同，大体分为无机盐及有机聚合物两类。感应淬火所用的淬火冷却介质主要是有机聚合物类。最广泛使用的是聚乙烯醇水溶液，常用质量分数为 0.05%～0.3%，液温为 20～45℃。这种介质可以浸冷或喷射冷却，主要适用于碳素结构钢、工具钢、低合金结构钢和轴承钢。由于其冷却速度比水低，比油高，因此能解决有些零件的淬裂问题，如花键轴、齿轮等淬火已广泛采用聚乙烯醇水溶液。

聚二醇类淬火冷却介质是近几十年来发展较快的新型淬火冷却介质，这种介质是由环氧聚合物所组成，其主要特点是具有逆溶性，即常温时聚合物完全溶解于水中，而当液温升高至 75℃左右，聚合物由水中析出。因而当赤热的零件与聚二醇水溶液接触时，零件表面即沉积一层薄膜，延缓了零件的冷却速度。从而减少了零件的变形与开裂危险性。聚二醇水溶液在 3%～5%低浓度时，由于能破坏蒸汽膜的形成，缩短了蒸汽膜的冷却阶段，可以避免淬火零件产生软点；当浓度提高到 15%～30%时，由于在零件表面形成厚膜，显著降低冷却速度，可解决零件开裂及变形问题。聚二醇水溶液也适用于浸淬或喷射淬火，用于自回火时，由于会消耗淬火液，被认为是不经济的。

92. 聚合物淬火冷却介质在感应淬火中应用效果如何？

感应淬火件大多数是中碳钢及低、中合金结构钢，采用聚合物淬火冷却介质取得了较好的效果。例如，由 48CrMo 钢制作的瓦楞辊，其辊齿表面硬度要求≥58HRC，淬硬深度≥1mm。过去用水作淬火冷却介质时，产生了淬裂问题。采用 JY8-20 聚合物淬火冷却介质进行瓦楞辊超音频及中频淬火，较好地解决了淬裂问题。某种瓦楞辊淬火部位外径为 360.96mm，采用 JY8-20 聚合物淬火冷却介质感应淬火后，表面硬度为 58～62HRC，淬硬层深度为 3mm。感应淬火处理各种瓦楞辊 5000 多件无裂纹。

93. 淬火冷却介质的温度、压力、流量和添加剂含量对冷却能力有何影响？

1）一般水溶性淬火冷却介质随温度升高冷却能力下降，而淬火油在温度升高时，流动性增强，冷却能力变化不大。聚合物淬火冷却介质如 PAG 淬火冷却介质，在 75℃左右时，添加剂与水会分离，因此使用温度应有一定范围。图 3-18 所示为温度变化对 JY8-20 冷却特性的影响。

2）淬火冷却介质的压力对冷却能力有明显影响。喷射压力对水冷却能力的影响见图 3-19。

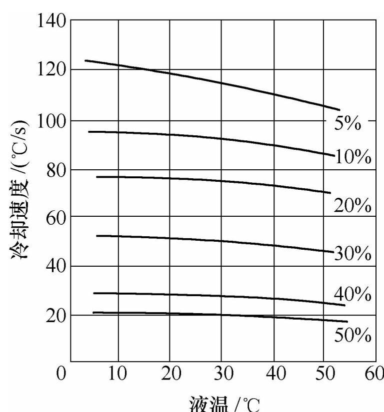


图 3-18　温度变化对 JY8-20 冷却特性的影响

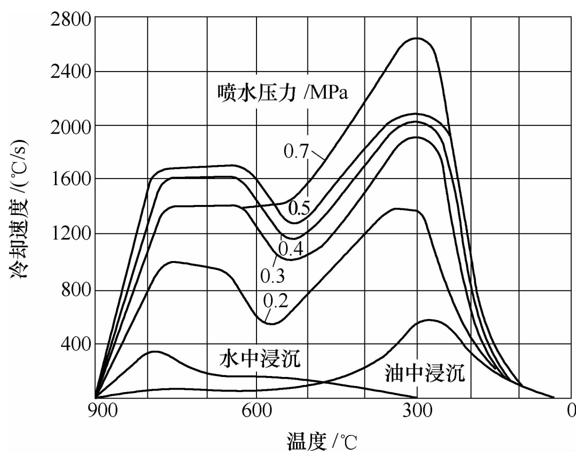


图 3-19　喷射压力对水冷却能力的影响（水温为 15℃）

3）淬火冷却介质的流量与冷却能力是正比关系，埋液淬火工件浸在静止液体中，但仍可以进行工件表面加热，而当液体一流动立即完成工件淬火，淬火冷却介质流量越大，冷却能力也越大。

4）添加剂含量与冷却能力有直接影响，聚合物淬火冷却介质的含量越高，冷却能力越低，因此调整聚合物淬火冷却介质的含量就可以得到不同的冷却速度，使淬火冷却介质的冷却能力在水和油之间变化。图 3-20 所示为不同含量 AQ251 水溶液与自来水、L-AN22 全损耗系统用油的淬火冷却对比曲线。

94. 感应淬火有哪些新的冷却方法？

工具热处理工艺中有一种称为双液淬火工艺，如易裂的高碳钢工具采用水淬油冷，目的是在奥氏体不稳定区用水快冷，而在马氏体转变区用油缓冷，解决工件淬裂问题。此工艺是卓有成效的，笔者在量具感应淬火中，使用过此方法。

现在乌克兰明斯克汽车厂对转向节、轮毂等零件采用“可控间断性冷却”淬火工艺，研制了“可控间断性冷却工艺和设备”，这种工艺能交替进行强烈冷却，并控制冷却时间和间隔冷却时间，它的实质是双液淬火和自回火，但它是由可靠的装置进行了压力、流量、时间的控制和保证，对解决感应淬火的淬裂开辟了新途径。

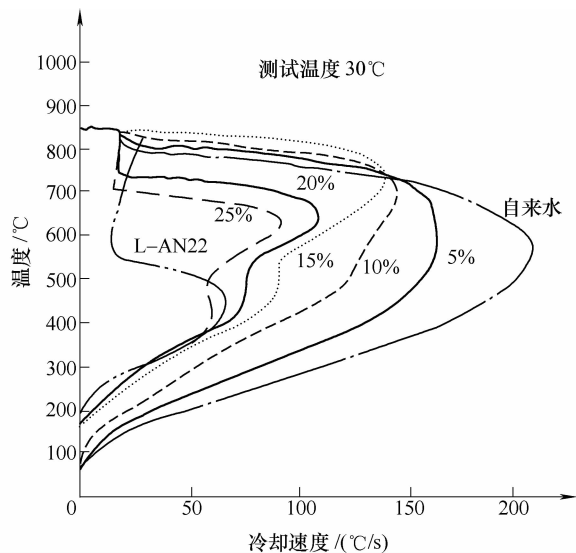


图 3-20　不同含量 AQ251 水溶液与自来水、L-AN22 全损耗系统用油的淬火冷却对比曲线

95. 感应淬火件的回火有哪几种方法？

感应淬火工件回火的主要目的是降低淬火应力，避免产生淬火裂纹；有时，回火是为了降低硬度以达到工件技术要求。

工件感应淬火后的回火，大致有以下三种方式：

（1）自回火　工件淬火时，冷却不进行到底而提前中断，使邻近淬硬层的心部的残留热量传到淬硬层，从而使淬硬层再次加热，达到一定的回火温度，使淬硬层得到所要求的组织与性能。这种方法，早期被用于工具凿子、钢轨等的淬火。

前苏联早在 20 世纪 50 年代，就开始应用于感应淬火工件，如曲轴轴颈、齿轮、销子等许多汽车零件，其过程可以用图 3-21 来表示。

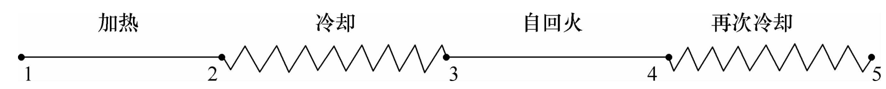


图 3-21　感应加热、淬火、自回火、再冷却的过程示意

注：1 ~ 2 段感应加热，2 ~ 3 段表面冷却，3 ~ 4 段自回火，4 ~ 5 段再次冷却。

在有些自回火工艺中，4 ~ 5 段是用再次喷水冷却，而大部分自回火，4 ~ 5 段是让工件在空气中自然冷却。

自回火工艺的优点是省掉了一套回火设备。以曲轴轴颈淬火为例，在汽车制造厂由于采用此工艺，使生产线上节省了一台功率 100kW 的回火炉与 $30m^2$ 的生产面积。此外，还节省了电能及维修等费用。但是，自回火工艺也存在不足之处，因

此，其应用受到了限制。

1）自回火工艺只适用于加热后工件心部有足够残留热量的工件，并且此残留热传到淬硬层各点应该是均匀的；否则，工件自回火后，淬火表面各区硬度不一致，甚至个别区域没有进行自回火。例如，汽车飞轮齿圈一次加热淬火后，要求48～56HRC，采用自回火取得很好的效果，齿圈各部自回火温度是均匀的。但对曲轴轴颈淬火时，对中间主轴颈及靠法兰侧的主轴颈出现了所谓边缘效应，即轴颈中间段自回火温度高；而两侧过渡区靠近曲柄，该部分因邻近未加热金属而散热快，自回火温度低。因此，整个区段的中段硬度相对低，而两侧过渡区段硬度相对高，而此段又正是拉应力区，是最易产生淬火裂纹的区段。

边缘效应可用图3-22来说明，试样中间段自回火效果好，两侧效果差，产生硬度差别约5HRC。试验证明，自回火适用于加热工件直径大、热容量大的加热方式，即 $d > D_s$，热效率高的方式，不适于热传导加热方式及直径小、心部热量过小的工件。

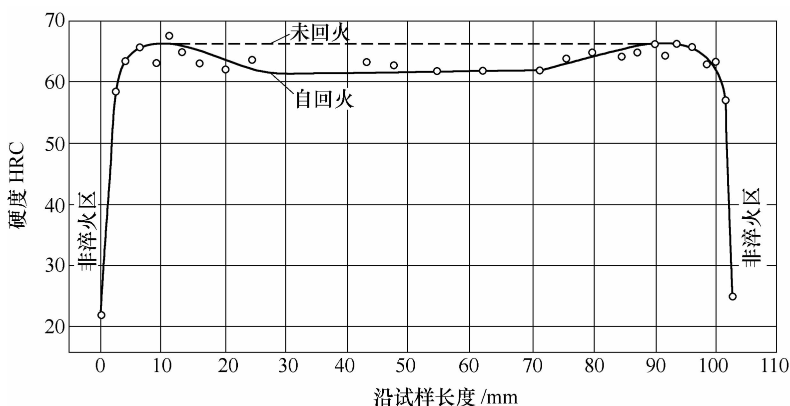


图3-22　自回火产生边缘效应的试样

2）自回火工艺的另外一大优点是它的及时性。众所周知，感应淬火工件，一般要求及时回火，以防止在回火前产生裂纹。自回火在生产实践中，证明由于及时回火，对凸轮轴的凸轮崩裂及其他一些在回火前易产生裂纹的工件，有较好的防止开裂的效果。

（2）感应回火

在现代感应加热装置中，感应回火应用日趋扩大，其理由是可以在线生产，缩短生产周期，并且弥补了自回火未能解决的一些困难点。

感应回火因简便，可以在线生产，并且解决了自回火存在边缘效应等缺点而为现代生产所采用。感应回火一般有两种方式：

1）利用原来淬火加热用电源，在原感应器装备下，用降低功率的办法来进行感应回火。这种方法的优点是一次装卸完成了淬火与回火工序，但因为占用了淬火

工位，所以降低了生产率。

这种工艺应用于摩托车曲柄等这些小零件上。半轴扫描淬火后，也曾使用同感应器用淬火工艺中频电压的 1/5 ~ 1/6 进行扫描感应回火。其缺点是在回火低温条件采用原来淬火加热的电源，其电流频率必然是高于正常频率，因此，淬硬层的回火完全靠热传导，其热效率较低。

2）采用合适的较低频率的另一套电源与感应器进行回火，现在广泛采用这种方法。因为感应淬火件的回火温度都低于居里点，而绝大部分低于 300℃，此时，在低温下的电流透入深度常是 800℃下电流透入深度的 1/10 ~ 1/4。因此，回火工件选用的电流频率要比淬火加热时的电流频率要低许多，习惯上采用 1000 ~ 4000Hz，有些直接采用工频，如气缸套与飞轮齿圈等。

回火感应器一般采用多匝，有效圈与工件的间隙加大，而且回火部分的面积常比淬火区域为大。轮毂回火感应器，如图 3-23 所示。

半轴采用扫描淬火工艺时，其回火亦采用感应回火，此时，采用另一种较低频率的电源，用多匝感应器，进行一次加热回火。

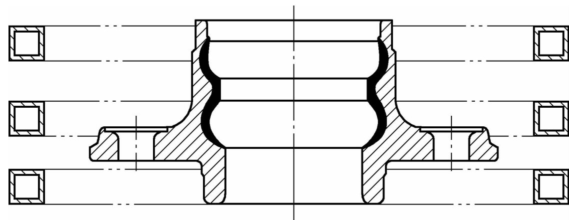


图 3-23　轮毂回火感应器

3）感应回火的优点：

①　加热时间短，生产率高，感应低温回火升温速度为 4 ~ 20℃/s，中高温回火升温速度为 5 ~ 30℃/s，气缸套用工频回火，一次 3 件，220℃回火时间在 30 ~ 40s。

②　能得到稳定与较好的力学性能。

96. 感应热处理除用于表面淬火外，还有哪几方面的应用？

感应热处理除表面淬火外，还应用于以下几个方面：

（1）消除应力和正火　图 3-24 示出一个柔性的水冷线圈，包住一个套管的平接焊口，对焊接位置进行消除应力或退火。图 3-25 示出一个装有硅钢片的线形感应器，用于对焊管的纵向连续焊缝的退火。线形感应器将焊缝处加热到 Ac_3 温度以上，从而使该处组织发生再结晶。拖拉机高压油管两端是冷镦扩口的（20 钢），也采用感应正火，使镦头处晶粒恢复常态。

（2）穿透淬火和回火　油井工程用管子，其外径在 $\phi60 \sim \phi410$ 之间，壁厚在 5 ~ 16mm 之间，已应用 1000Hz 中频电源进行穿透加热淬火，回火（600 ~ 700℃）也用中频电源进行。丝杠毛坯调质也已成功地采用中频加热。

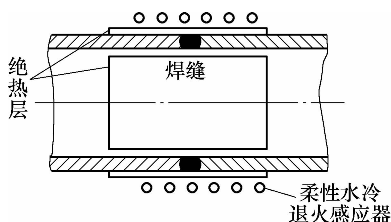


图 3-24　消除焊缝应力现场施工用的退火感应器

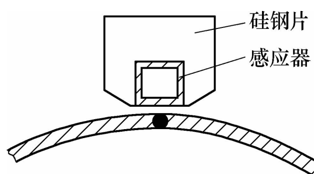


图 3-25　电焊管退火用感应器

（3）应用感应加热进行拉管　冷拔管子在冷态下减小其直径，每次减小量很小，此外还要退火、酸洗，工艺复杂。而采用感应加热拉管，可以将直径减小量增加 1.5 倍，并且取消了退火、酸洗等工序。

97. 什么是钢的感应加热自冷淬火？

钢的淬火有两个基本要求，第一是必须加热到奥氏体化温度，第二是立即快冷。其冷却速度要大于临界冷速 $v_{临}$。感应加热的特点是只有工件表层被加热，如果表层奥氏体化后立即停止加热，而邻近部未加热的金属能迅速地将加热层的热导走，并且其冷却速度超过 $v_{临}$，则表层就被淬硬了。它不是靠外面喷淬火液快冷，而是由内部金属来冷却，这种淬火工艺只有在高能密度加热状况下才能实现。感应加热是高能密度加热方法之一，由于功率密度极大，加热时间极短，因此亦称之为脉冲加热。对中碳钢自冷淬火，一般要求它的功率密度要达到 4.6kW/cm^2（30kW/in^2），并且与加热表层相邻的冷金属有足够的热容量，亦即是直径较大的圆柱体或厚板才行。

感应加热时涡流在工件上产生的热量主要用以加热所需的表面层，但是在此过程中还有两种热量从工件上散发，第一种是从加热表面向外散发的称为辐射热，如图 3-26 所示；第二种是从工件加热层向心部传导的，称为传导热。这两种热损耗均随工件加热层温度升高而增加，如图 3-27 所示。

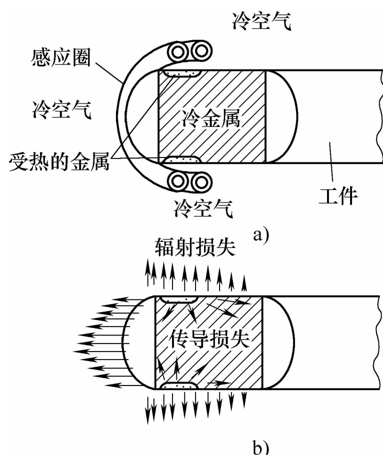


图 3-26　感应加热时工件上散发的辐射与传导损耗
a）加热条件　b）辐射与传导损耗示意

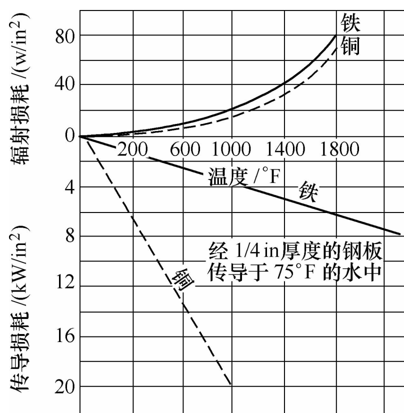


图 3-27　辐射与传导损耗曲线

这两种损耗，特别是热传导的作用，加深了理论上的加热层深度，此加深的深度 $d_{加}$（mm）可表达为 $d_{加}=0.2\sqrt{t}$，式中 t 为加热时间（s）。随着功率密度的降低与加热时间的增长，损耗增加。热传导损耗在采用自回火工艺中，被有效地利用了，而热辐射损耗则未能应用。热传导作用应用于工件的自冷淬火的先决条件是必须在高能密度状态下。

热辐射损耗与热传导损耗相比，仅为其几十分之一。从图上的曲线可看出，热辐射损耗以 W/in^2 为单位，而热传导损耗的单位为 kW/in^2，钢由 800℃的表层传到相邻金属的热传导损耗约为 $5kW/(in^2 \cdot s)$。

98. 钢件在保护气氛中感应淬火有几种方法？有何实例？

感应淬火的加热时间极短，但表面还是有氧化的，在热化学过程中，解决这个问题的方案是必须在真空中加热工件。虽然这个方案很好，但不是最经济和科学的。

减少并消除在奥氏体阶段生成氧化膜的方案，应该在加热阶段使用一种中性气氛。有几种气体可作该种用途，但对于工业应用而言，迄今为止，仍广泛使用氮气，因为它的价格比较便宜。根据生产率和工件结构，有以下两种实例可参考：

（1）球头销感应淬火　众所周知，感应淬火加热时间极短，常在 10s 以内，因此，表面氧化轻微，淬火表面一般呈米黄色及黑色斑点，这就是氧化膜剥落现象。有些产品如汽车球头销、曲轴齿轮等，产品技术要求特别严格，如轿车球头销的球面表面粗糙度要求 $Rz \leqslant 3\mu m$，杆部 $Rz \leqslant 10\mu m$。上海某厂资料普通感应淬火球头表面存在 5μm 的氧化膜，见图 3-28。

为此，需采取保护气氛防护。保护气氛有氮气，氩气等。该厂对感应淬火件使用电子探针分析，结果见图 3-29。从图 3-29c 可见，氮气保护的零件感应淬火后氧含量接近未保护的 1/4。球面的表面粗糙度达到图样要求，淬火前两个零件的球部分别为 Rz1.4μm 及 0.86μm，淬火后分别为 1.4μm 及 0.85μm。以上数据说明保护气氛条件下，球头销感应淬火后，表面粗糙度基本不变，而零件表面颜色仍保持机械加工后的光泽。

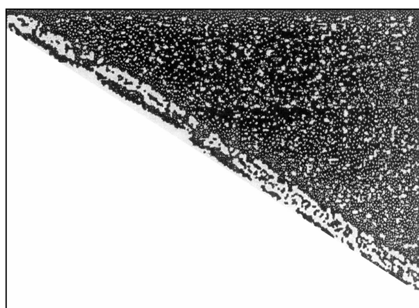


图 3-28　普通感应淬火后，零件表面存在 5μm 的氧化膜

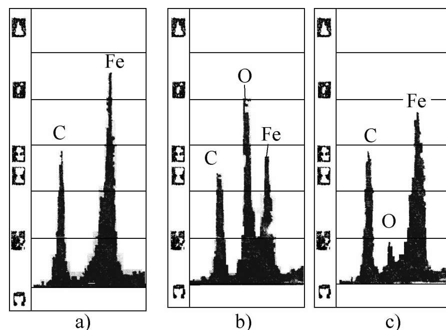


图 3-29　感应淬火件电子探针分析结果对比
a）基材　b）淬火时未保护　c）淬火时保护

球头销保护气氛感应淬火的工装如图 3-30 所示。

（2）在保护气氛下连续上料操作的通道　图 3-31 所示为具有保护气氛和连续上料通道的回转工作台。这个系统利用回转工作台在两个水帘密封的通道中输送工件。由于不使用门或其他类似的机械装置，因此对工件在上下料时提供了一个很好的保护。

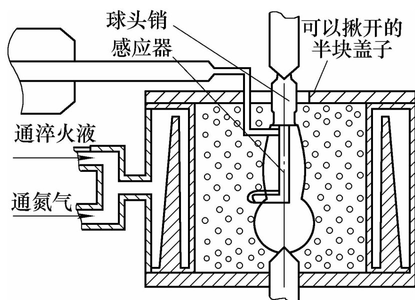


图 3-30　球头销保护气氛感应淬火的工装

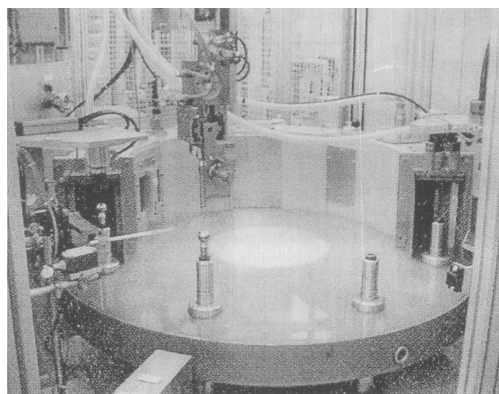


图 3-31　具有保护气氛和连续上料通道的回转工作台

99. 感应退火的目的是什么？常用于哪些零件？

感应退火由于是工件在加热达到退火温度后在空气中冷却，因此，实际上是感应正火，但习惯上称为退火。

感应退火广泛应用于钢管焊缝退火，冷镦后工件的再结晶退火（例如高压油管连接部），还有渗碳后需要局部退火的一些工件（例如摩托车连杆、花键轴螺纹部分等）。钢管焊缝退火使焊缝粗大的、不均匀的晶粒经正火得到细小晶粒；冷镦工件局部退火使冷镦后拉长的晶粒恢复为细小均匀的晶粒，以免工件该部分在使用中因降低力学性能而损坏；渗碳件的局部如螺纹部分退火等，主要是为了降低该部分的硬度。

100. 钢管焊缝为什么要进行退火？退火质量如何检验？

钢管焊缝退火，有钢管纵向直焊缝退火与对接圆焊缝退火两种。

（1）钢管纵向直焊缝退火　钢管纵向直焊缝退火主要的目的是细化晶粒。因为焊缝在感应加热到焊接温度并焊合时，加热区的晶粒变粗，随后的快冷会使此区域形成低碳马氏体，尽管采用了低碳钢制的材料［w（C）0.05% ~0.15%］试图避免焊缝产生低碳马氏体，但由于焊接过程中会形成偏析，局部碳含量可达到正常碳含量的 2 ~3 倍，如 w（C）为 0.06% 的钢管，偏析段可达 w（C）0.2% 加上钢中锰含量的因素，焊缝局部硬度可达 40HRC 左右。此硬度区段最易产生裂纹，使钢管工作失效，焊缝退火正是针对此问题而来，它能细化晶粒，消除应力与降低硬

度。采用感应加热，只加热焊缝段，对壁厚 8 ~ 15mm 的钢管，焊缝宽度在 20mm 左右。

焊缝退火感应器采用平面加热的横向磁场加热。此时，即使$\frac{\text{钢管壁厚}}{d_{800℃}} < 3.5$，其电效率仍是很高的，因此，可选用较低频率的电源，如 1 ~ 3kHz。焊缝退火温度直接影响正火组织的质量，温度过高，会使焊缝区晶粒比母材为大，过低则产生焊缝未热透，组织未能全部细化。

（2）对接钢管焊缝退火　对接钢管焊缝退火，一般采用的是圆环形感应器，从感应加热电效率来讲，应采用较高的频率，即$\frac{\text{钢管壁厚}}{d_{800℃}} > 3.5$。

（3）钢管焊缝硬度及显微组织检查　正火区的显微组织必须与母材金属相似，热影响区的晶粒比母材晶粒粗，说明正火温度太高；热影响区的硬度比母材高，说明正火温度太低；如果显微组织中出现少量粗晶粒混在许多小晶粒中，说明正火温度略高，应稍稍调低。

101. 零件再结晶退火有否实例？

高压油管冷镦端头退火，主要是为了使冷镦后拉长的晶粒再结晶、细化。图 3-32是高压油管镦头部分示意图，技术要求 $R1$ ~ $R1.5$mm 部分退火后，晶粒恢复常态。

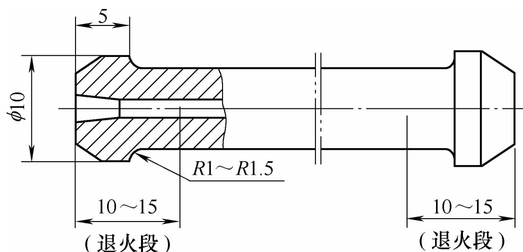


图 3-32　高压油管镦头部分再结晶退火

102. 制订与执行感应热处理工艺过程卡应遵守哪些规定？

感应热处理工艺过程中，加热、冷却、自回火等一些工艺参数，对淬火零件质量均有影响，因此必须遵守有关工艺规定。

（1）加热

1）加热的目的：①在加热完毕时，零件表面层的温度应等于或稍高于淬火温度；②得到合适的加热层深度。

2）加热温度与加热层深度取决于以下因素：①在加热时间内传给零件的平均有效功率；②加热时间；③电流频率。

功率越大和加热时间越长（当其他条件相同时），则零件的加热层和淬硬层深度越大；若加热功率或时间不足，就会得到不完全淬火或者完全没有淬火。当用时间继电器调节控制加热时间时，每月至少用秒表（机械或电子秒表）检查时间继电器两次。时间继电器经调整后，应随即用机械秒表核对。时间继电器的误差应在 ±0.1s 以内，使用能量监控器的应按该装置规定要求。

（2）冷却　零件应在加热完毕后立即冷却或经一定的预冷时间后冷却，以完成淬火。

1）淬火结果的优劣表现在以下三方面：①在冷却后直接测得的硬度值；②零件中内应力的大小；③淬硬层的深度、区域与显微组织。

2）淬火结果由下列参数决定：①冷却时间；②淬火冷却介质（水、油、聚合物水溶液等）的温度；③淬火冷却介质喷出时的压力（或流量）。

冷却时间越长，淬火冷却介质温度越低，喷射压力越高，则淬火越强烈，零件表面硬度越高，淬火应力越大，形成裂纹的危险性也越大。

为了避免产生废品，必须严格遵守工艺，按照规定的工艺参数范围，调节好预冷和冷却时间，并用秒表核对。

（3）自回火

1）自回火的结果表现在：①淬火硬度的降低；②内应力消除的程度。

2）自回火的结果取决于：①回火温度最高值；②自回火时间。

零件从冷却完毕起停留在空气中到再浸湿为止（如后工序需及时加工的话），足够完成回火作用的时间，叫做自回火时间。此时间应按照工艺卡规定执行。零件冷却时间越短，则当其他条件相同时，零件心部的余热也越多，自回火温度越高，内应力消除越彻底，并且使淬火硬度降低得越多。

3）自回火质量的检查：①测量淬火硬度降低了多少度，把淬火后自回火零件与未经自回火（淬火时冷透）零件作对比，可以得出自回火使零件硬度的降低值；②检查有无淬火裂纹；③用锉刀锉刚喷液完零件的表面，观察表面回火色（氧化色）能大致确定自回火温度；④用红外测温仪直接测量自回火温度，是最可靠的。

103. 何时应进行感应热处理规范的修订？

感应热处理规范因电源设备的变更及工夹具的磨损、变形等原因，需要进行修订。

1）当高、中频电源，淬火变压器，感应器的型号有所改变，或型号虽不变但用一台装备代替另一台装备时，必须修订热处理规范。

2）由于使用时间长或使用不当，使感应器有效圈定位夹具发生磨损或变形，经修理过的感应器重新使用时，都必须修订热处理规范。

3）淬火零件机加工工艺的改变，影响淬火部位尺寸或零件定位位置时，也要重新修订规范。最常见的零件中心孔大小变化，会影响工件定位基准，对半轴会使法兰面的间隙值产生变化。

104. 感应热处理工艺检查包括哪些内容？

感应热处理工艺检查一般包括以下内容：

1）零件淬火前的加工质量，包括零件淬火部位及与定位有关的尺寸、预备热处理质量、钢材质量与主要成分如碳含量等。

2）设备、装备是否与工艺卡相符，包括淬火机床号、淬火变压器型号、变压比、夹具的定位尺寸、感应器号、有效圈的尺寸、喷水孔的清洁度等。

3）实际淬火时规范的各项参数是否与工艺卡上所规定的数据相符，包括：①中频变频器的电压、功率，高频发生器的阳极电压、槽路电流或回路电压；②加热、预冷、喷水时间；③淬火液的浓度、温度、流量或压力；④扫描淬火时的托架移动速度、限位开关或撞块的位置。

4）零件的淬火质量包括表面硬度、淬硬区域尺寸、外观淬火质量及裂纹等，必要时进行淬硬层深度及显微组织检查。

105. 感应热处理工艺制订中常用的表格有哪些？

感应热处理工艺制订中常用的表格有：

（1）零件记录卡　这是一种为工艺人员试订规范用的表格，见表 3-9。

表 3-9　感应热处理零件记录卡

零件号或零件名称：

电源及淬火机床号或名称：

频率______ Hz；电压______ V；功率______ kW

淬火部位：			
淬火变压器变压比			
抗流圈匝数		耦合（刻度）	
电容量/kvar		反馈（刻度）	
感应器号		感应器号	
发电机空载电压/V		阳极空载电压/kV	
发电机负载电压/V		阳极负载电压/kV	
发电机电流/A		阳极电流/A	
有效功率/kW		栅极电流/A	
功率因数		回路电压/kV	
加热时间/s 或 kW·s		加热时间/s 或 kW·s	
预冷时间/s		预冷时间/s	
冷却时间/s		冷却时间/s	
喷水压力/MPa		喷水压力/MPa	
淬火冷却介质温度/℃		淬火冷却介质温度/℃	
淬火冷却介质名称质量分数（%）		淬火冷却介质名称质量分数（%）	
移动速度/（mm/s）		移动速度/（mm/s）	

工艺人员调试零件后，将有关参数记入此表，并将调试规范时发现的问题也记入表中，左行用于中频，右行用于高频。

（2）感应热处理零件分析检验卡（见表 3-10）　这是一种包括零件材料成分

分析、表面硬度、淬硬层深度及宏观、显微组织检查结果的综合表格。工艺人员根据本表结果和结论，可以进行工艺卡的参数制订。

表 3-10　感应热处理零件分析检验卡

1. 零件材料成分（质量分数）　（%）

C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	W	V	Mo

2. 零件表面硬度　HRC：

3. 淬硬层深度/mm

（绘出断面硬度曲线）

4. 宏观淬硬层分布：

（照片或按比例简图）

5. 显微组织及级别：

6. 检验结论：

（3）感应热处理工艺卡　一般分两页、第一页包括零件材料、技术要求、简图、工艺路线及工序等。工序主要包括感应淬火、中间检查、回火、检查（硬度、外观、磁力检测、金相组织定期抽查等）。如果零件淬火后需进行校直的，校直工序也可一并列入本卡中。

第二页主要内容为工艺参数。高、中频可通用此表。工艺参数主要内容与记录卡相似。

1）必须注意的是零件简图十分重要，淬火部位可参照产品图局部绘制，而尺寸需要将磨量添加上去，因为产品图上是成品尺寸，工艺卡上是工序尺寸。

2）淬硬区域要标出尺寸及公差。

3）检查项目应有百分率，如 100%，5% 等。

4）工件与有效圈的相对位置必须在简图旁标出，扫描淬火件要标出起始点与终了点相对位置。

第 4 章　感应淬火件的力学性能与结构设计

106. 机械零件感应淬火的主要目的有哪些?

（1）提高零件表面的耐磨性　感应淬火最初应用于曲轴颈表面，其目的就是为提高轴颈的耐磨性，在此以前曲轴是采用调质的，感应淬火使曲轴颈的耐磨性大大提高。

（2）提高零件的疲劳强度　感应淬火进一步的应用是提高淬火件的疲劳强度，例如 EQ1092 汽车半轴，在 ±3000N·m 转矩下，疲劳试验 200 万次，仍然完好无损，而原来调质工艺，半轴的疲劳寿命不到 30 万次；又如转向节球头销原工艺为 18CrMnTi 钢渗碳淬火，后改用 45 钢感应淬火，零件的弯曲疲劳寿命从 8 万次提高到 200 万次以上；曲轴圆角感应淬火则使曲轴的疲劳强度提高 1 倍；有些产品曲轴疲劳强度达到 700MPa 以上。

（3）减少畸变　渗碳齿轮由于工艺时间长，淬火后畸变大；而齿轮感应淬火，特别是同步双频（SDF）齿轮淬火，工艺时间短，畸变小，使齿轮精度提高，噪声减低。

（4）节能、节材、节省劳动力与环保　采用低淬透性钢制造齿轮等零件，并进行感应淬火。它首先是钢材无合金元素，节省了材料费用；感应加热是局部加热淬火，时间短，因此大大节能；感应淬火可实现自动化在线生产，这样节省了劳动力；无油污、无有害气体排放，更加保护环境。

（5）取代深层渗碳　深层渗碳是周期长，电耗大的工艺。近年来国外已研发成功用感应淬火来取代深层渗碳，取得了很好的效果。

107. 感应淬火件的耐磨性如何？与渗碳淬火件相比，哪种工艺的耐磨性好?

感应淬火最常用于提高零件表面的耐磨性。曲轴轴颈由于采用表面淬火，提高了表面硬度。表面淬火曲轴与调质处理曲轴相比，由于硬度提高，耐磨性提高好几倍，这是众所周知的。

相同材料用不同工艺获得相同硬度时，其耐磨性是否有差别呢? 表 4-1 列出了几种材料用不同工艺处理获得相同硬度试样的耐磨性对比数据。由表 4-1 可看出，对某些钢材，感应淬火可得到比铅浴淬火更好的耐磨性，耐磨性并随硬度的提高而提高。

工具钢感应淬火后，耐磨性和耐用度均有显著提高，有关试验数据见表 4-2。

中碳钢经感应淬火和经渗碳淬火相比，试样对比数据见表 4-3。从表中可看出，18Cr2Ni4WA 钢渗碳淬火后，虽然表面硬度比 40CrNiMoA 钢感应淬火后为低，但在

同样实验条件下，试样磨耗量却低得多。10 钢渗碳淬火试样的耐磨性也较 45 钢感应淬火试样的耐磨性为好。

表 4-1 不同材料和热处理工艺的耐磨性对比

钢牌号 \ 工艺	感应加热		铅浴加热	
	硬度 HRC	磨耗/(10^{-7}g/km)	硬度 HRC	磨耗/(10^{-7}g/km)
35Mn2	46～48	13.8	45～47	39.9
35CrNi3A	52～53	3.8	52～53	4.4
45Cr	56～57	3.1	56～58	3.9
T7A	62～63	2.8	63～65	2.5

表 4-2 感应淬火工具的耐用度

工具种类	钢牌号	耐用度	
		火焰炉中加热	感应加热
铣刀	9SiCr	260min	685min
圆柱滚刀	T10A	85min	152min
冲切凸模	T10A	120×10^3 周期	138×10^3 周期
拉深凹模	T10A	72×10^3 周期	236×10^3 周期

表 4-3 渗碳淬火与感应淬火试样的耐磨性

钢牌号	热处理工艺	硬度 HV	磨损/mg	
			试样	青铜轴瓦
18Cr2Ni4WA	渗碳 1.5mm，780℃淬火，170℃回火	675	0.5	4.5
40CrNiMoA	860℃淬火，550℃回火，感应淬火 1mm 深，180℃回火	748	4.5	4.0
10	渗碳 1.5mm，780℃淬火，170℃回火	782	1.0	3.0
45	860℃淬火，550℃回火 感应淬火 1mm 深，180℃回火	748	7.0	3.8

渗碳钢耐磨性高的原因是由于表层具有较高的碳含量，碳钢 w(C) 低于 0.43%时，渗碳件在耐磨性方面占优势，而当 w(C) 高于 0.45%时，感应淬火件的耐磨性就提高了，这是 T. H. HACAHOBA 根据履带板销的田间试验曾得出的结论，因此，拖拉机履带板销改用 50 钢感应淬火新工艺。表 4-4 通过不同 w(C) 的钢感应淬火后的耐磨性对比说明钢材成分的影响。表内数据证明，T7 钢磨损量最小，它的碳含量、硬度也最高；45 钢与 50Mn 耐磨性相差不多；45Cr 钢的耐磨性却介于 T7 钢与 50Mn 钢之间，说明钢中含有铬能提高耐磨性。

表 4-4　不同成分钢材感应淬火后的耐磨性

钢号	化学成分（质量分数,%）			硬度平均值 HRC	磨损凹体体积 /$10^{-3}mm^3$
	C	Mn	Cr		
45	0.50	0.58	0.18	62	371
50Mn	0.53	0.70	0.10	63	357
45Cr	0.42	0.55	1.10	60	329
T7	0.72	0.22	0.15	65	310

根据感应淬火件的磨损和耐磨性方面的资料，可得出如下结论：

1）应用感应加热对工件进行表面淬火，使原来未淬火工件的耐磨性大大提高。

2）与普通整体淬火件相比，感应淬火件由于表面硬度高和不脱碳，其耐磨性提高了。

3）用中碳钢制造的感应淬火件的耐磨性，由于表层硬度和碳含量均较低，其耐磨性比渗碳淬火件低。

108. 感应淬火件的疲劳性能如何？与调质、正火、渗碳相比，哪种工艺的性能好？

感应淬火提高零件疲劳性能的原因，除因表层本身强度显著增高外，还因在表层形成很大的残留压应力，表面残留压应力越大，零件抗疲劳性能越高。当零件淬硬层过浅时，由于残留拉应力接近表面，疲劳强度因此降低。局部淬火时，如果使具有残留拉应力的过渡区处在零件工作长度的表面时，零件疲劳强度将急剧下降，甚至低于未经感应淬火者，这点是必须注意的。表 4-5 是感应淬火试样与调质、渗碳试样的疲劳性能对比。表 4-6 是 40Cr 钢正火、调质及感应淬火试样的疲劳强度对比数据。

表 4-5　感应淬火试样与调质、渗碳试样的疲劳性能对比

试样形式	疲劳强度/MPa		
	12CrNi3 渗碳试样	40CrNiMoA 调质试样	40CrNiMoA 感应淬火试样
光滑试样	520	441 ~ 470	618
缺口试样①	294	137	588

① 缺口深度为 0.4mm，锥角为 60°，圆角半径为 0.2mm。

表 4-6　40Cr 钢正火、调质及感应淬火试样的疲劳强度

热处理方法	疲劳强度/MPa	热处理方法	疲劳强度/MPa
正火	196	感应淬火 0.9mm	323
调质	235	感应淬火 1.5mm	470
感应淬火 0.5mm	284		

从以上两表可得出以下结论，即感应淬火试样的疲劳强度比渗碳、调质、正火

试样高，对缺口试样更为突出，感应表面淬火几乎可完全消除缺口对疲劳寿命的不利影响。表 4-7 是 45 钢具有切口试样用不同热处理规范进行疲劳试验的结果。

表 4-7 45 钢具有切口试样疲劳试验结果

热处理规范	硬度 HRC	疲劳强度/MPa
正火	180 ~ 210HBW	95
调质	26 ~ 31	134
感应淬火未回火	63 ~ 64	647
感应淬火，自回火，200℃ 30s	60 ~ 62	637
感应淬火，自回火，270℃ 30s	55 ~ 58	686
感应淬火，自回火，430℃ 30s	45 ~ 48	279
感应淬火，150℃炉中回火 1.5h	58 ~ 60	647
感应淬火，180℃炉中回火	56 ~ 58	686
感应淬火，250℃炉中回火	53 ~ 54	613
感应淬火，350℃炉中回火	45 ~ 47	289

从表 4-7 中可得出以下结论，即当其他条件（淬硬深度、加热及淬火规范）相同时，270℃自回火或 180℃炉中回火至硬度 56 ~ 58HRC 的试样具有最大疲劳强度（686MPa）。增加硬度至 60 ~ 64HRC 或不回火使试样疲劳强度略为降低。硬度降至 45 ~ 48HRC时，试样疲劳强度大大降低，但仍为调质试样的 2 倍，正火试样的 3 倍。

109. 感应淬火件的抗冲击性能如何？与调质、正火、渗碳相比，哪种工艺的性能好？

细化组织的感应淬火可以显著提高材料的冲击韧度，已被试验所证明。这主要是通过降低材料的脆性转化温度而达到目的的。在某一试验温度下，如粗晶粒材料发生冲击脆断，而晶粒细化者则可能转为韧性断裂，使冲击韧度提高。而在脆性转化温度以上，晶粒度对冲击韧度的影响并不大。表 4-8 给出了单面表面淬火对 40 钢和 40Cr 钢夏比（V 型缺口）冲击试样冲击韧度的影响。由表可见，单面淬火深度为截面的 20% ~30% 时，原始正火处理的试样冲击韧度降低 50%，原始调质处理的试样降低 10% ~30%。但冲击韧度的绝对值仍然是相当高的。

表 4-8 40 钢和 40Cr 钢感应淬火时的夏比（V 型缺口）试样的冲击韧度

钢号	原始状态	淬硬层深度 /mm	回火温度 /℃	冲击韧度 /（J/cm^2）
40	正火	无	无	46
40	正火	1.5	200	23.5
40	正火	2.5	200	24.5
40	调质	无	580	133

（续）

钢号	原始状态	淬硬层深度/mm	回火温度/℃	冲击韧度/（J/cm^2）
40	调质	1.5	200	94
40	调质	2.5	200	90
40Cr	调质	无	600	107.8
40Cr	调质	1.5	200	96
40Cr	调质	2.5	200	84.2

感应加热表面淬火试样的抗冲击性能与渗碳淬火试样进行对比，用 10mm × 10mm 不带缺口试样所作的冲击试验表明，当 45 钢与 40Cr 钢表面淬硬层深度为 1.1 ~ 2mm，冲击韧度为 $59J/cm^2$ 时，经 130℃ 回火后可达 $98J/cm^2$。而 20 钢和 20Cr 钢渗碳淬火并经低温回火的试样的冲击韧度低于 $29 \sim 39J/cm^2$。以上试验结果说明，虽然表面淬火将产生冲击韧度的降低，但不像渗碳试样降低得那样多。

110. 感应淬火件的淬硬层深度对零件扭转性能有何影响?

感应淬火轴类零件适用于扭转条件下工作。感应淬火使轴表面提高了硬度并且产生了残留压应力，提高了轴件的疲劳强度。轴件淬火时，淬硬层深度越深，扭转强度亦越大，可用表 4-9 四组试验数据来说明。表 4-9 中有四种钢，其中 40 钢、50 钢是中碳结构钢、淬透性较低，40 钢是原始冷拔状态、50 钢是热轧状态，心部硬度不同。40Mn2 与 42CrMo 淬透性较好，40Mn2 钢经过调质，心部硬度较高。

表 4-9　不同钢牌号轴的不同淬硬深度静态扭转试验

钢牌号、状态 直径/in①	淬硬层深度/in①（轴径的百分数,%）		硬度 HRC		扭转屈服强度/MPa	扭转极限强度/MPa
	到 40HRC	到 20HRC	心部	表面		
40 钢冷拔 ϕ1.125	0.000(0.0)	0.000(0.0)	12 ~ 14	12 ~ 14	344.75	634.34
	0.120(10.7)	0.180(16.0)	20	53	606.7	1082.5
	0.123(10.9)	0.180(16.0)	20 ~ 22	54 ~ 55	579.1	1110
	0.140(12.4)	0.270(24.0)	16 ~ 18	55	556.7	1154
	0.143(12.7)	0.270(24.0)	17 ~ 18	55	641.2	1220
	0.153(13.6)	0.280(24.9)	16	55	765.3	1220
	0.160(14.2)	0.300(26.7)	16 ~ 17	55	717	1268
	0.190(16.9)	淬透(50)	23	55 ~ 56	737.7	1323
	0.200(17.8)	淬透(50.0)	20 ~ 22	54 ~ 55	717	1344
	0.250(22.2)	淬透(50.0)	34	55	827.4	1434
	0.281(25.0)	淬透(50.0)	28 ~ 29	56	910.14	1447.9

（续）

钢牌号、状态 直径/in①	淬硬层深度/in①（轴径的百分数,%）		硬度 HRC		扭转屈服强度 /MPa	扭转极限强度 /MPa
	到 40HRC	到 20HRC	心部	表面		
40Mn2 调质 ϕ1.530	0.176(11.5)	0.180(11.8)	20～21	53	—	1061.8
	0.178(11.6)	0.180(11.8)	20～21	53	668.8	1137.6
	0.199(13.0)	0.240(15.7)	21	54～55	689.5	1130.7
	0.266(17.4)	0.366(23.5)	19	54～56	786	1234
	0.276(18.0)	0.350(22.9)	19	54～55	806.7	1379
	0.349(22.8)	0.470(30.7)	18～19	56	806.7	1399
50 钢热扎 ϕ1.125	0.170(15.1)	0.218(19.4)	18～19	60～61	544.7	1082.5
	0.172(15.3)	0.246(21.9)	17～18	60～61	737.7	1268.6
	0.207(18.4)	0.327(29.1)	16～18	60～61	841.2	1461.7
	0.209(18.6)	0.360(32.0)	14～15	60～62	786	1454.8
42CrMo 热扎 ϕ1.125	0.000(0.0)	0.000(0.0)	8～10	8～10	151.6	668.8
	0.125(11.1)	0.177(15.7)	9～11	56	420.59	965.3
	0.135(12.0)	0.162(14.4)	12～14	57	517.1	1013.5
	0.167(14.8)	0.202(18.0)	8～9	57	613.6	1082.5
	0.169(15.0)	0.212(18.8)	8～9	56～57	592.9	1110
	0.195(17.3)	0.261(23.2)	8～10	56	717	1234
	0.209(18.6)	0.251(22.3)	10～11	57～58	689.5	1254.8
	0.302(26.8)	0.360(32.0)	11～13	57～58	813.6	1572
	0.302(26.8)	0.378(33.6)	17	57～58	882.5	1572

① 原试验资料用英制，1in＝25.4mm。

1）从表 4-9 中可得出，轴的静态扭转强度（屈服强度与极限强度）均随淬硬层深度的增加而上升。

2）淬透性高的钢轴（如 42CrMo），其淬硬层总深度（测到 20HRC）的绝大部分为有效淬硬层深度。因此，当淬硬层总深度较浅时，即能达到 40 钢轴淬硬层总深度较大时所达到的扭转强度。例如，40 钢轴有效淬硬层深度为轴径的 15%、淬硬层总深度为轴径的 25% 时所达到的扭转强度，42CrMo 钢轴只需有效淬硬层深度为轴径的 17%，淬硬层总深度为轴径的 23% 即能达到。40 钢有效淬硬层深度浅是由钢的淬透性低所决定的。

3）试验还证明，轴的疲劳寿命随着淬硬层总深度增加到一定值后达到极限，见图 4-1。在同样扭转应力下，相同扭转强度的轴，40 钢比 42CrMo 钢轴的疲劳寿命略长一些。有人认为，这与 40 钢淬硬层总深度略高有关。

通过以上试验数据，可以认为对扭转轴仅要求有效淬硬层深度是不够的，因为

钢的淬透性或心部硬度不同，扭转强度亦不同。当预测轴件疲劳寿命时，扭转强度、淬硬层总深度与心部硬度三者必须同时考虑。一般应规定轴件有效淬硬层深度为轴径的15%，总淬硬层深度为轴径的25%，此时轴能得到最佳的疲劳寿命。

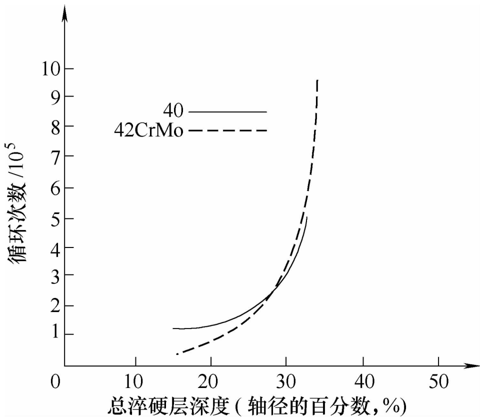


图 4-1　疲劳寿命与轴总淬硬层深度的关系

注：405MPa 交变应力下经 100 万次未失效，停止试验。

有效淬硬层深度对静态扭转性能有影响，而总淬硬层深度对疲劳性能影响大。对两者同时规定要求，比只要求有效淬硬层深度更为合理。

淬硬层深度过深，轴件表面残留压应力降低，会增加零件变形，因此淬得过分深是不必要的。

111. 淬火件的硬度应如何选用？

钢感应淬火后所达到的表面硬度值与钢的碳含量关系最大。当钢的 w(C) 为 0.15% ~0.75%时，可将试验数据归纳为以下公式：

$$\text{HRC} = 21.5 + 60\ (2C - 1.3C^2)$$

式中　C——钢的 w(C) 值，如 w(C) 为 0.35%时，用 0.35 代入；

HRC——马氏体淬硬层硬度的平均值。

表 4-10 是几种钢感应淬火后所达到的硬度平均值。

表 4-10　几种钢感应淬火后达到的硬度平均值

钢牌号	化学成分（质量分数,%）		加热温度/℃	硬度平均值 HRC
	C	Mn		
20	0.15	0.63	1030 ~ 1050	36.5
20Mn	0.21	0.87	1010 ~ 1030	43.5
25	0.28	0.45	990 ~ 1020	47
35	0.35	0.57	940 ~ 960	52
40	0.38	0.50	940 ~ 960	55.5
45	0.46	0.48	910 ~ 940	58.5
50Mn	0.51	0.75	900 ~ 930	61.5
T7	0.74	0.25	880 ~ 900	66.0

钢感应淬火的硬度本质上是反映金属材料表面局部区域抵抗塑性变形能力的指标。在一定的材料和热处理规范条件下，它与材料的拉伸、弯曲等性能指标有着对应的关系。

感应淬火件的硬度范围，根据零件使用性能确定，一般有以下几种：

1）用于摩擦部分，如曲轴轴颈，凸轮表面，硬度越高，耐磨性越好，曲轴颈常用55～62HRC，凸轮轴常用56～63HRC等。

2）用在压碎、扭转及受剪切部分零件，硬度应高，如锻工锤头表面、汽车半轴、钢板弹簧销等，常用56～63HRC、50～55HRC等。

3）对承受冲击载荷的零件，或用于齿轮、花键等部分淬透并要求韧性时，硬度应适当降低，如飞轮齿圈采用48～56HRC或40～48HRC等。

对于灰铸铁、球墨铸铁及可锻铸铁零件，由于石墨的存在，用洛氏硬度计测得的硬度是马氏体与石墨的平均硬度。球墨铸铁硬度范围可达45～55HRC，灰铸铁硬度可达38HRC以上或40HRC以上。

112. 感应淬火件的淬硬层深度，一般应如何选择？

淬硬层深度一般根据淬火件的工作条件及使用中是否修磨而定。

1）在摩擦条件下工作的零件，一般淬硬层深度应用1.5～2.0mm，磨损后需修磨的，淬硬层深度还可大些，为3～5mm。

2）受挤压及受压力载荷的零件淬硬层深度应为4～5mm。

3）冷轧辊淬硬层深度应大于10mm。

4）受交变载荷的淬火零件，其应力不太高时，有效淬硬层深度可为零件直径的15%；在高应力时，其有效淬硬层深度应大于直径的20%，以提高零件的疲劳强度。

5）轴肩或圆角处的淬硬层深度一般应大于1.5mm。

6）受扭力的有台阶的轴，其淬硬层在全长上必须连续，否则由于台阶过渡处淬硬层中断，轴的扭转强度会比未经感应淬火的轴的强度还要低。

感应淬火件的淬硬层深度应有上、下限范围。一般波动范围为1～2mm。例如，淬硬层深度为0.5～1.0mm、1.0～2.0mm、1.0～2.5mm、2.0～4.0mm、3.0～5.0mm、≥1.2mm、≥2.0mm、≥3.0mm等。硬度亦应有上、下限，如56～64HRC，52～57HRC、≥50HRC、≥45HRC等。

113. 淬火件的淬硬区域应如何正确标注？

感应淬火件的特点之一是局部淬火，将真正需要淬火的区域进行表面淬火，既节省能源，又便于校直，但淬硬区域的选择与标注，有一定的惯例，否则不便于生产与检验。

（1）曲轴轴颈淬硬区　当圆角不淬硬时，曲轴轴颈淬硬区见图4-2a；当圆角淬硬时，曲轴轴颈淬硬区见图4-2b。

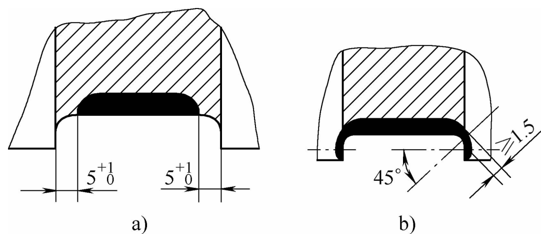


图4-2　曲轴轴颈淬硬区域的标注

a）圆角不淬火　b）圆角淬火

（2）气缸套内表面淬火淬硬

区　两端留不淬硬区可避免端部裂纹，实际上活塞环也达不到这两端，如图 4-3 标注，便于操作及检查。

（3）轴类零件淬硬区域　一般轴类零件两端应倒角，淬硬区应离端头 3 ~ 5mm，如图 4-4 所示。由于生产过程中零件定位条件变化、感应器磨损变形、淬火规范波动等原因，淬硬区域应有公差范围。

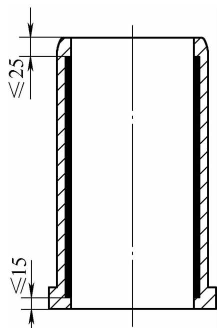


图 4-3　气缸套淬硬区的正确标注

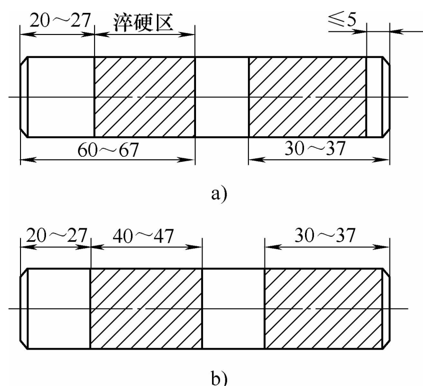


图 4-4　轴类零件淬硬区域的标注
a）正确的标注　b）不正确的标注

轴类零件采用图 4-4a 的标注时，是以左端面为基准的尺寸链，能较精确地控制淬硬区的范围；当采用图 4-4b 的标注时，尺寸串联，淬硬区公差范围扩大，并且不方便检测。

114. 感应淬火件的几何形状应如何适应淬火工艺？

感应淬火件的几何形状与淬火工艺性密切相关，由于设计人员对感应淬火工艺不甚了解，常易将渗碳淬火要求直接转化为感应淬火要求，这是不正确的。感应淬火件在几何形状上忌薄壁、尖角、小孔及不对称淬火，因此设计时，应力求避免这种结构。

（1）尖角产生裂纹　凸轮轴主轴颈油槽原设计如图 4-5a 所示，四个边角处易产生裂纹，以后将半圆槽改用圆弧铣刀加工成圆弧槽（见图 4-5b），裂纹即消除。

（2）曲轴油孔处过热开裂　当采用周向加热时，涡流易在油孔两边集中，锐角一边由于金属质量小，更易过热。在油孔表面增加 $C2$ 倒角，能使锐角处电流集中现象缓和，如图 4-6 所示。

（3）阶梯轴感应淬火　由于一般扫描淬火时，要使轴的阶梯处淬硬层连续有一定困难（采用同时淬火、纵向电流加热等方法已能解决），因此设计结构上台阶直径差应尽可能小，对于有退刀槽的轴件，淬硬层应超过槽底，以消除沟槽带来的应力集中，如图 4-7 所示。

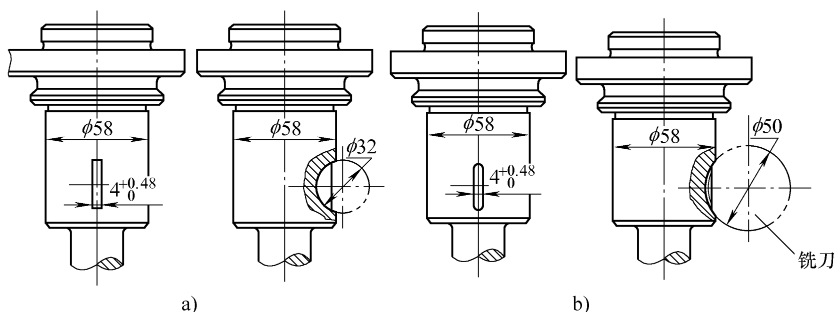


图 4-5　凸轮轴轴颈油槽结构改进

a）原设计　b）改进后

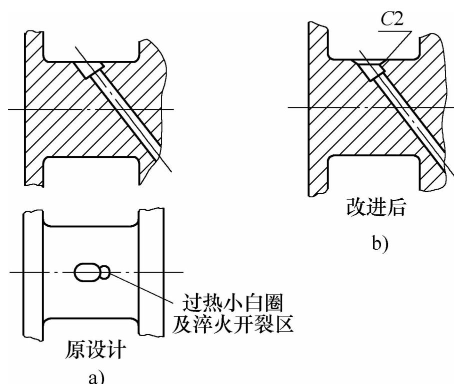


图 4-6　曲轴油孔表面增加倒角

a）原设计　b）改进后

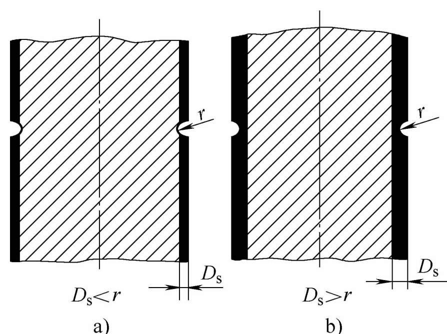


图 4-7　淬硬层深度与凹槽深度的关系

a）不正确　b）正确

（4）带法兰的轴　当淬硬层分布未达到圆弧处时，此时轴的过渡区强度最弱，受扭力时此处最易断裂。许多扭力轴感应淬火经验及试验数据已证明，扭力轴淬硬层应延伸到法兰面，圆弧处应淬上火，并有一定的淬硬深度，如图 4-8 所示。

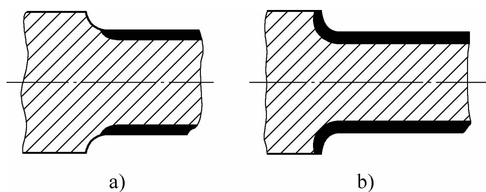


图 4-8　轴颈圆角处淬硬层分布

a）不正确　b）正确

115. 感应淬火件的技术要求能否与渗碳淬火件的技术要求等同？

感应淬火与渗碳淬火都是表面淬火，但所用钢牌号不同，热源不同，工艺操作不同，因此技术要求不能等同。在硬度方面，渗碳淬火件由于表层碳含量高于中碳钢，因此硬度比中碳钢表面淬火高。淬硬层区域对渗碳淬火件可用防渗碳剂来控

制，感应淬火件则靠机床、感应器与夹具等各种精度来保证，特别是定位基准，对感应淬火件至关重要。感应淬火件涡流途径、磁场偏移、尖角、小孔等均会产生局部加热温度不均，会产生硬度偏差、淬硬层深度不一致等问题。对中碳钢零件，碳、锰、铬、钼等元素含量波动，会直接影响淬透性，使淬硬层波动。因此，感应淬火件用钢应有严格的成分要求，而淬硬层深度上下波动比渗碳层深度范围宽，对台阶轴台阶连接处的温度常有大直径处过热而深，小直径处欠热而浅等规律。这是磁场偏移等因素造成的，它不可能与渗碳层的仿形层深相等同。

116. 齿轮超速感应淬火后表面残留应力有多大?

近年来，日本 Neturen 公司对齿轮进行超速感应淬火（SRIQ），45 钢齿轮的齿根部残留压应力达到 -1018MPa。齿轮超速感应淬火后表面残留应力及对比见表 4-11。

表 4-11　齿轮超速感应淬火后表面残留应力及对比

工艺	材料	淬硬层深度/mm	残留应力/MPa
超速感应淬火	S45C（45）	0.82	-1018
超速感应淬火	S45C（45）	0.45	-1165
普通感应淬火	S45C（45）	0.9	-182
渗碳淬火	SCM420（20CrMo）	0.5	-290
碳氮共渗	S45C（45）		+12

117. 感应淬火件上的残留应力有哪些？它是如何分布的?

工件感应淬火后，在表面与淬硬层心部之间产生残留应力，其产生示意图见图 4-9。

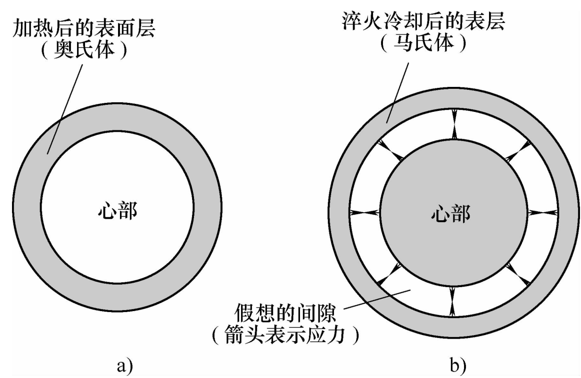


图 4-9　感应淬火件残留应力产生示意图

a）加热后　b）淬火冷却后

图 4-9a 表示加热结束后的状态。工件加热时，表层因热而膨胀，但表层受到冷的心部的牵制，因而产生塑性变形，此阶段没有应力产生。图 4-9b 表示淬火冷

却结束后的状态。此时，冷的心部仍然没有变化，但表层因受急冷，产生了马氏体相变。马氏体体积比原有的组织要大，又是一种硬度很高的组织。当它受到心部的牵制时，不能发生塑性变形，如图 4-9b 中箭头所示，在表层和心部之间一方面发生弹性变形，另一方面又互相牵制。可以设想，如果表层和心部如果分离，则两者之间会形成间隙，而实际上两者是不能分离的。因此，膨胀的表层受到心部的牵制处于压缩状态，而心部则与此相反，处于拉伸状态，受压的表层与受拉的心部最后均衡地维持着平衡，所产生的应力称为残留应力。感应淬火时，表层产生的残留压应力（用“-”表示），心部产生的残留拉应力（用“+”表示）。感应淬火件所以具有高的疲劳强度，从本质上讲是因为表层中存在残留压应力。图 4-10 所示为感应淬火件内部残留应力分布。

从图 4-10 可知，最表面残留压应力不是最大，这常是因最表面产生脱碳所致。在短时间感应加热条件下，圆柱表面的最大残留压应力一般为 80 ~ 100MPa，齿轮等特殊形状件表面一般为 30 ~ 80MPa，这种残留压应力能提高淬火件的静载与动载强度。

零件局部表面淬火时，淬硬表面产生残留压应力，而在淬火与未淬火过渡区则产生残留拉应力，如图 4-11 所示。

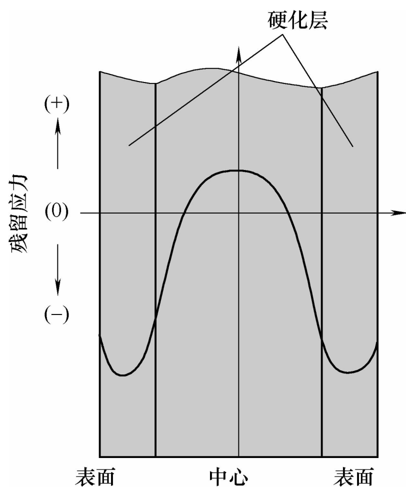


图 4-10　感应淬火件内部残留应力分布

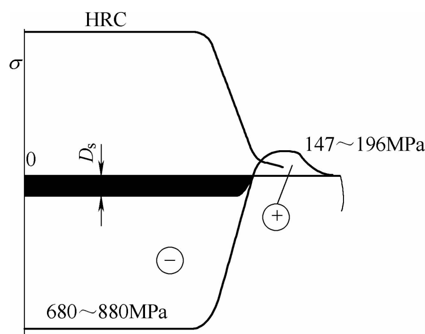


图 4-11　淬火与未淬火表面过渡处产生残留拉应力

残留拉应力与残留压应力作用相反，降低淬火件的静载与动载强度。设计人员必须考虑该部位不能与其他应力叠加而降低强度。例如，曲轴颈只淬轴颈，则圆角部分原本是应力集中部位，如果叠加上这个残留拉应力则对轴颈强度降低许多。为此，轴颈圆角处采用滚压或轴颈加圆角感应淬火，将残留拉应力转为残留压应力，提高了曲轴颈的疲劳强度。

118. 淬硬区部位及范围对弯曲疲劳性能有何影响?

某汽车公司曾对汽车球头销零件进行试验研究，球头销原用 18CrMnTi 钢，球头部位渗碳淬火。改用 45 钢球头销并在不同部位进行局部感应淬火后，再进行弯曲疲劳试验，断裂部位如图 4-12 所示。球头销淬硬区分布与弯曲疲劳循环次数的关系见表 4-12。仅球头淬火时（见图 4-12a），淬火过渡区与最大应力的颈部重叠，疲劳次数最低。淬硬区如图 4-12b 所示时，颈部得到强化，淬火过渡区在较小应力部位，其疲劳次数比前者提高两倍多。淬硬区如图 4-12c 所示时，强化效果最好，疲劳次数较图 4-12a 所示淬硬区试样提高 20 倍。

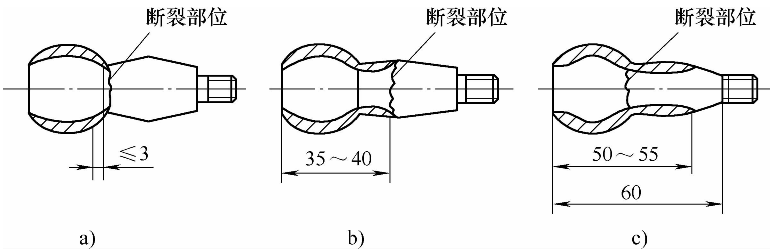


图 4-12　球头销淬硬区分布与弯曲疲劳试验断裂部位

表 4-12　球头销淬硬区分布与弯曲疲劳循环次数的关系

钢牌号	热处理条件	载荷/N	转速/(r/min)	循环次数/10^4	淬硬区及破断情况
18CrMnTi	球头渗碳淬火 + 低温回火	1500	1450	8.33	颈部断
45	感应淬火 + 170℃回火 1h	1500	1450	8.3	淬硬区见图 4-12a，颈部断
45	感应淬火 + 170℃回火 1h	1500	1450	23.21	淬硬区见图 4-12b，过渡区断
45	感应淬火 + 170℃回火 1h	1500	1450	192.792	淬硬区见图 4-12c，未断
45	感应淬火 + 170℃回火 1h	1500	1450	666.275	淬硬区见图 4-12c，未断
45	正火 + 感应淬火	1500	760	212	淬硬区见图 4-12c，颈部断
45	调质 + 感应淬火	1500	760	192	淬硬区见图 4-12c，颈部断

119. 感应淬火件不回火对零件力学性能有何影响?

张世琼等曾进行过感应淬火件不回火对试样疲劳寿命影响的研究。试验表明，感应淬火后不经回火，可保留工件表层的残留压应力，提高工件的疲劳强度，因而认为不回火可提高产品性能，并可节约能源。日本学者则提出感应淬火零件疲劳强度增高的原因，是由于快速加热淬火的组织和表面有残留压应力，并且得出感应淬火件经过低温回火（180～200℃）比仅进行感应淬火的耐磨性为高的结果，如图 4-13 所示。

从图 4-13 可看出，不管频率高低，凡是在 150～200℃范围段回火的，其磨损量比未回火的均减少，这也就说明了残留压应力的存在降低了耐磨性，回火温度再

提高，磨损量又增加，这是由于硬度降低所致。

因此，感应淬火的零件，凡是要求淬硬层具有耐磨性和淬硬层承受摩擦（含研磨）的，在淬火后必须进行低温回火；反之，淬硬层不受摩擦力的，低温回火的必要性就可根据其他条件综合考虑。拖拉机履带板销、后桥轴等零件在实际生产中并无回火工序。

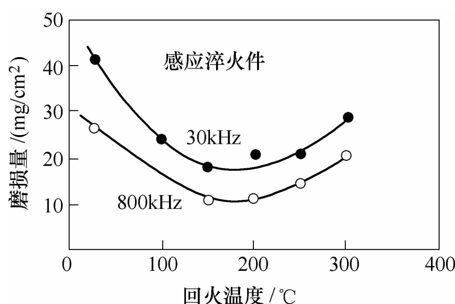


图 4-13　感应淬火件的耐磨性与回火温度的关系

120. 哪些是应尽量避免的不良淬硬层分布？

感应淬火件的淬硬层（区域）分布与零件结构强度关系密切，因为淬火与未淬火区边缘处存在残留拉应力，会降低零件强度，如果这一过渡区正好又处在危险断面，则破坏折断的概率就大大增加了。

（1）汽车传动轴淬硬区分布的改进　汽车传动轴原来淬硬区只淬到花键完整段（见图 4-14a），花键退刀处正好是淬火过渡区，使用中花键过渡处断裂（45 度正断型与垂直切断型断口）。通过检查和分析得知，断裂处正好是淬硬区与原始状态的过渡区，表面硬度从大于 50HRC 降到 25HRC，从表面残留压应力状态转为拉应力状态，断口显示抗扭强度不足。图 4-14b 所示为改进后的淬硬区分布。因此，淬硬区的位置极为重要，决不能把过渡区设计在花键退刀处，而应延长，使圆弧处也得以淬火。

（2）汽车主动轴淬硬区分布的改进　汽车主动轴曾发生 ϕ50mm 轴颈退刀槽处早期断裂问题。针对退刀槽处半径 R 小及淬硬区不连续两个关键问题进行了试验，取得了明显效果。三种试件的淬硬区分布及表面硬度如图 4-15 所示，疲劳试验结果见表 4-13。

表 4-13　汽车主动轴试件疲劳试验结果

试件号	调质硬度 HBW	退刀槽处半径 R/mm	退刀槽处硬度 HRC	循环次数 /10^5	破坏部位
1	241 ~285	0.5	24	4.977	退刀处
2	241 ~285	0.5	24	1.415	退刀处
3	241 ~285	2.0	53	35.4	未断

以上结果说明：

1）退刀槽处半径 R 大小与疲劳强度有直接影响，增大 R，提高了轴的疲劳强度。

2）退刀槽处淬硬了，使台肩处淬硬层连续，消除了拉应力区的影响，提高了

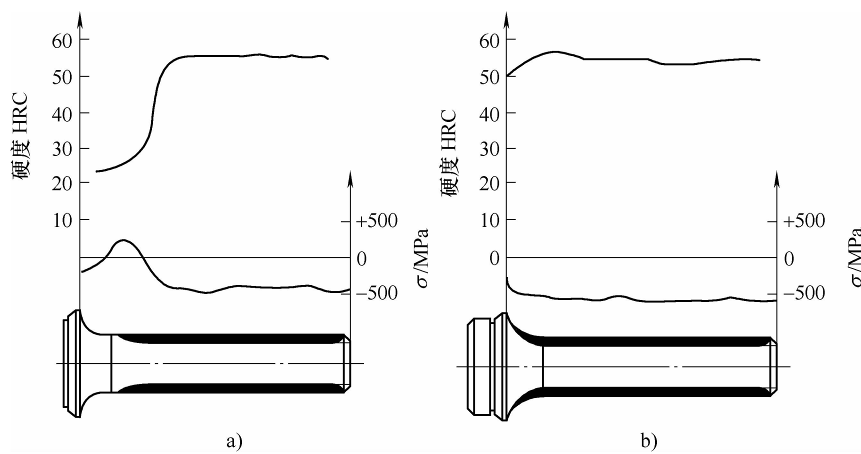


图 4-14　汽车传动轴淬硬区分布

a）原来淬硬区　b）改进后的淬硬区

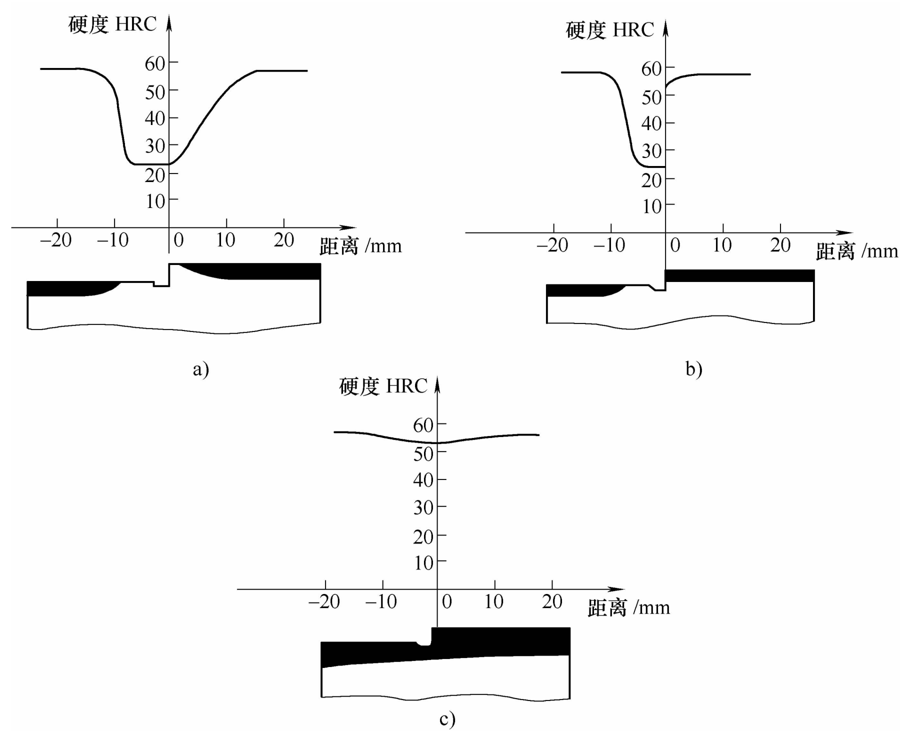


图 4-15　三种试件的淬硬区分布及表面硬度

a）试件 1　b）试件 2　c）试件 3

该处的强度，两项改进的效果使主动轴的疲劳循环次数增加了近10倍。

（3）动力输出轴轴头断裂实例　动力输出轴轴头（见图4-16a），使用中发生花键过渡处断裂，经检查过渡处淬硬层特浅，淬硬层中只有少量马氏体，如图4-16b所示。

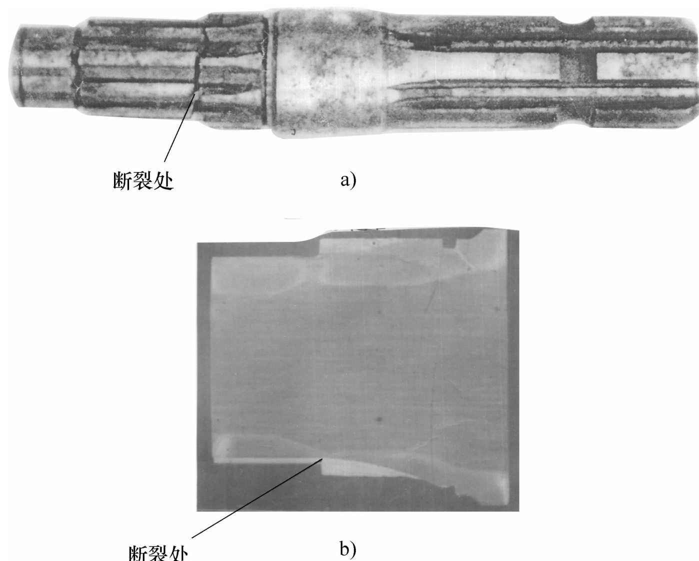


图4-16　动力输出轴轴头
a）工件外形及断裂位置　b）淬硬层

原工艺为扫描淬火，因感应加热时台阶处磁力线偏移，导致该处淬硬层很浅。改用整体一次感应淬火（矩形管纵向加热）后，淬硬层深度增加，如图4-17所示。

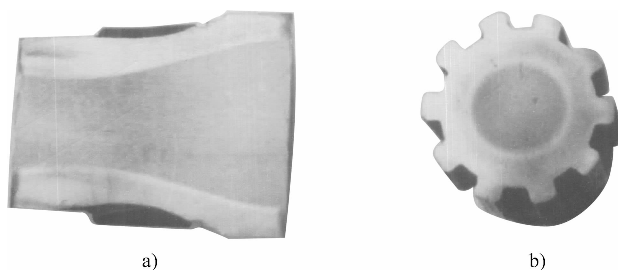


图4-17　改进工艺后的淬硬层
a）纵向截面　b）横向截面

经疲劳对比试验，改进前 5 个试件的平均循环次数为 10.9 万次，在花键台阶处断裂，疲劳源均在花键台阶处；而改进后的 4 个试件均达到 150 万次，因未断而下架。分析认为：台阶处淬硬层连续，淬火表面存在压应力能抵消缺口应力集中的作用，淬硬层深度达到轴径的 10% 时，能得到最佳疲劳强度。

（4）曲轴颈不合格的淬硬层图形　早在 20 世纪，美国底特律柴油机阿立森分公司就规定了曲轴颈验收的淬硬层图形，如图 4-18 所示。应尽量避免淬硬层中断，这是因为淬硬层中断，极大地降低了轴颈的疲劳强度。

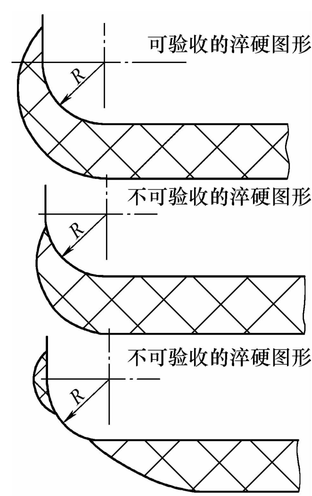


图 4-18　曲轴颈验收的淬硬层图形

第 5 章　感应热处理工艺调整与典型零件感应热处理工艺

121. 感应热处理工艺调整包括哪些内容?

感应热处理工艺调整是在淬火机床、工艺装备调整完成后进行的，它包括：

（1）电规范调整　调出淬火所需功率，并使高、中频电源设备不过载，处在良好的工作状态下。

（2）热处理规范调整

1）加热速度或功率密度大小的调整。

2）最终加热温度、淬火温度或加热、预冷时间的调整。

3）自回火温度、时间或感应回火、炉中回火温度、时间的调整。

4）淬火液浓度、温度、流量或压力的调整。

5）零件与感应器相对位置的调整。

以上内容一般在感应热处理工艺卡中通过参数反映。

122. 如何调整高频及超音频电源设备的电规范?

（1）一般先输入高压用半波或较低阳极电压进行调谐　电子管高频加热时有三种状态，即欠电压、谐振及过电压。

1）欠电压状态。阳极电流/栅极电流之比值特大，阳流大而栅流小，回路中的功率减小。此时振荡管阳极损耗特大，引起阳极过热，甚至烧熔，振荡管出水温升特高。此种状态是调整中不采用的。图 5-1a 所示为欠电压状态。

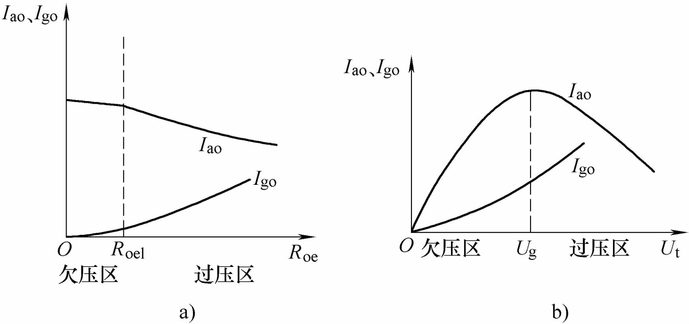


图 5-1　调节耦合及反馈手轮时阳流、栅流的变化

a）调节耦合时阳流与栅流的变化　b）调节反馈时阳流与栅流的变化

2）临界或轻微过压状态。此时振荡器的效率最高，输出功率大，是我们所希

望调整到的。此时阳流/栅流的比值 K 处于合适状态，见表 5-1。

表 5-1　振荡管阳流与栅流的额定值与 K 值

振荡管型号	FU-431 S	FU-22 S	FU-23 S Z	FU-433 S	FD-911 S
阳流/A	3.5	4.5	13	12	12
栅流/A	0.75	0.85	3	2.55	2.6
K（阳流/栅流）	4～6		4～7	4～7	7～10

3）过压状态。此时振荡管的栅流大，K 值小于合适值，振荡器效率还是较高的，但因功率消耗在栅极电路里，输出功率将降低，振荡管栅极因栅流大而过热。这种状态也是调整中应避免的。

（2）调节耦合与反馈手轮。调节耦合与反馈手轮时，阳流与栅流的变化规律，可用图 5-1 来说明。

1）耦合手轮增大刻度，阳流增加，回路电压也增高，此时振荡部分的输入与输出均增加。当增大耦合，阳流继续增大而回路电压不再增大时，表示输入在增加而输出不再增加，刚调过了最佳点。

2）反馈手轮增大，能使栅流增大，振荡器处于最佳工作状态时，阳流与栅流有一个合适的比例，可参看表 5-1 的 K 值，调至匹配状态。

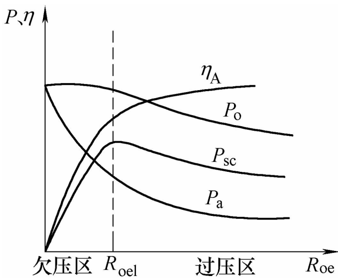


图 5-2　谐振阻抗对工作状态的影响

η_A—阳极效率　P_0—直流输入功率

P_{SC}—振荡功率　P_a—阳极损耗功率

当谐振阻抗 $R_{oe}=R_{oe1}$ 时，振荡器具有最大振荡功率；另外，阳极效率也高，如图 5-2 所示。

3）调整到最满意状态，应是处于谐振或弱过压状态，此时有高功率输出。当然，如果不需要满功率输出，可以将阳极电压调到需要功率值。

123. 真空管式高频电源与负载不匹配时应如何处理？

有时候在真空管式高频电源上加热工件时，会碰到与负载不匹配的问题，设备正常、感应器也正常，就是输出功率调不大，耦合已调到最大，反馈已调到最小，就是不匹配，即阳流与栅流之比处在严重的过压状态，栅流大到极限，阳流小得很，而感应器匝数也不能再减少了，此时应与设备电气人员研究，在振荡回路采取措施。例如：高频设备为 GP60-CR-13-1，工件为 195 曲轴连杆轴颈，电规范是：阳压 12.5kV，槽压 6.8kV，阳流 1.7A，栅流

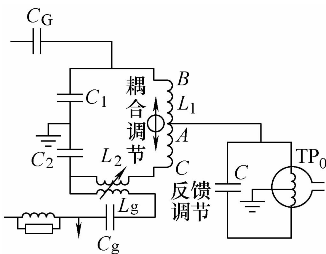


图 5-3　在振荡回路调高阳极线圈输出端电压

0.8A。呈过压状态，耦合手轮已调到最大，反馈手轮已调到最小。如图 5-3 所示，采取的措施是提高阳极线圈 L_1 的输出电压，将阳极线圈输出接点 A 往上移动 2 匝，阳极线圈 L_1 共 24 匝，A 点是原来位置，AC 间为 12 匝，调整后 AC 间变为 14 匝。经如此变更后，阳流应即增大，如表 5-2 所示。

表 5-2　改变阳极线圈输出端前后的匹配状态

测量时间	阳压/kV	阳流/A	栅流/A	槽压/kV	匹配状态
改进前	12.5	1.7	0.8	6.8	严重过压
改进后	12.5	2.9	0.8	6.0	较好

改进后阳流栅流比从 2.1 上升到 3.6，大有改善，但栅流还过大，超过额定上限 0.75A，不允许，以后将反馈电容 C_2 增加两只，电容量由原来的 21000PF（1500PF×14）增加到 24000（1500PF×16）使栅极电流能在 0.4～0.75A 范围内任意调节，达到了合适的阳流栅流比，以上设备调整，使设备输出功率增加了，匹配也合理了，满足了热处理工艺的需求。

124. 如何调整中频发电机的电规范？

中频发电机的合适电规范调整要求如下：

1）设备不过载，电参数应在额定值之内。

2）发电机与负载要相匹配，使发电机能输出全功率。

图 5-4 所示为中频发电机与负载。感应加热时的负载一般是一个振荡回路，振荡回路由感抗和容抗并联构成。负载的阻抗可能是感抗、容抗或纯电阻，它由电路的调谐情况来确定。当谐振时，振荡回路的功率因数等于 1 时，负载是纯电阻的，发电机仅输出有功功率。只有当回路内感抗等于容抗，即 $X_L = X_C$ 时，或者在并联条件下，电感支路内的感纳 B_L 等于电容支路的容纳 B_C 时，才能得到谐振。

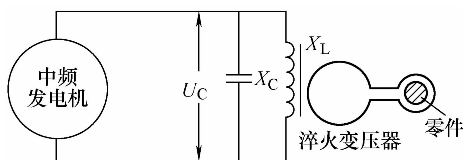


图 5-4　中频发电机与负载

$$B_L = 1/(\omega L), B_C = \omega C, \omega = 2\pi f$$

式中　L——电感（H）；

C——电容（F）；

ω——角频率（Hz）；

f——频率（Hz）。

谐振时，$B_L = B_C$，即 $1/(\omega L) = \omega C$。

如果电导为 G，则电路的导纳 Y 为

$$Y = \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2}$$

当谐振时，$B_L - B_C = 0$，所以导纳 Y 为最小值，即 $Y = G$。因为 $Y = 1/Z$，$G = 1/R$，

所以 $Z=R$。此时负载为纯电阻，电路阻抗为最大，发电机输给总电路的电流为最小，而支路内的电流要比总电路内电流大得多。因此，并联谐振又称为电流谐振。并联谐振时，发电机电流 I 最小，负载阻抗 Z 最大，功率因数最大，功率最大，用曲线表示如图 5-5 所示。

调谐回路实际上就是选择变压比（淬火变压器一次绕组匝数与二次绕组匝数之比）与接入电容量的大小，可以根据发电机电路内导纳最低值来调整。导纳可用下式求得：

$$Y = I_{发}/U_{发}$$

式中　$I_{发}$——发电机电流（A）；

$U_{发}$——发电机负载电压（V）。

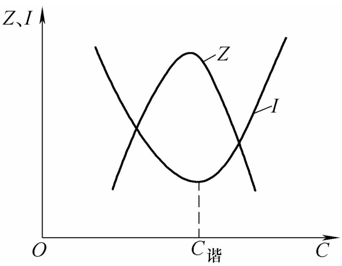


图 5-5　并联谐振时发电机电流、阻抗与电容关系

Z—负载阻抗　I—发电机电流

调谐开始时，一般电容量取最小；通过逐步增加电容 C，导纳 G 从高值降至低值；导纳最低值时的电容为 C_R，C_R 为谐振状态时的电容。图 5-6 所示为利用导纳最低值来确定调谐电容值。

(1) 调整匝比的判别　凡是感应器的阻抗越大的，即直径大而宽度小的感应器，$h_{感}/\phi_{感}$ 越小，需要越小的变压比；而阻抗越小的感应器 $h_{感}/\phi_{感}$ 越大，需要越大的变压比。对外圆加热感应器，第一汽车制造厂高频室已绘制出变压器匝比与感应器阻抗关系试验曲线，如图 5-7 所示。图中纵坐标匝比 N = 变压器一次绕组匝数/变压器二次绕组匝数，横坐标 $h_{感}/\phi_{感}$ = 感应器有效圈宽度/感应器有效圈内径。上述曲线是在 100kW、8000Hz、375V 条件下求得的，使用淬火变压器为 GP-010 型，匝比范围为 5/1 ~ 24/1，而感应器与工件间隙为 2.5 ~ 3mm。

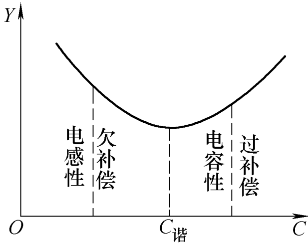


图 5-6　利用导纳最低值来确定调谐电容值

当中频发电机型号、电压不同时，一次绕组匝数见表 5-3。

表 5-3　不同中频发电机及电压时的 N 值

发电机型号	发电机电压/V	一次绕组匝数
BPSD100/8000	750	$2N$
BPSD100/8000	750	$\sqrt{2}N$
BPSD160/8000	750	$1.58N$
BPSD100/8000	375	$1N$

以上曲线，根据第一汽车制造厂实际应用，其误差为 ±1 匝。当出现下列情况时，N 值略有波动：

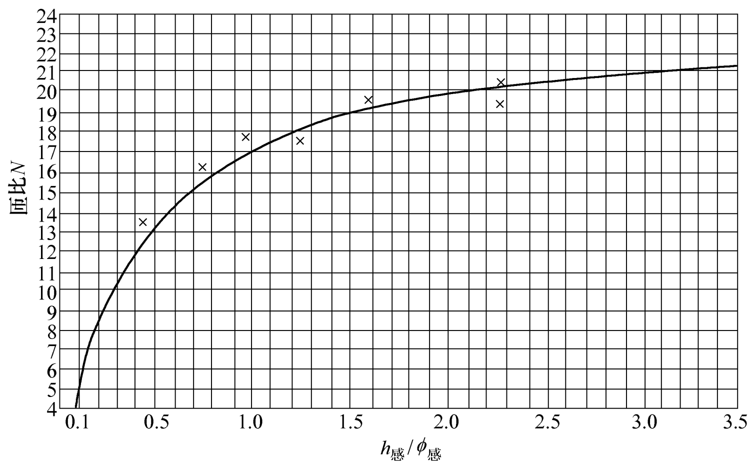


图 5-7　变压器匝比与 $h_{感}/\phi_{感}$ 关系曲线

1）电网频率降低较多，N 值略有增大。

2）感应器连接板（导电板）越长，感应器阻抗增大，N 值应降低。

3）感应器与工件间的间隙越大（$\phi_{感}$ 不变，而工件外径减小），则 N 值越减小。

4）当同一个工件，在同一感应器采用 2500Hz 中频发电机时，N 值要增大，例如：拖拉机发动机曲轴颈淬火，在 8000Hz 两台发电机并联时，用 18/1 变压比，而在 2500Hz 单台发电机时，却用 26/1 变压比。

当非外圆工件加热时，预选变压比没有曲线可供参考时，一般只凭经验估计。通过接入电容调谐，从电规范能判别变压比是否恰当，变压比应增加还是应减少。

（2）调整步骤

1）试调。由于变压比系估计匝数，没有确切把握，为避免过压或过流产生，开始用 50% 额定电压，电容量开始只接入少量；随后接通负载，随着不断增加接入电容量；记录各项参数列于表 5-4 中。

表 5-4　中频发电机调谐记录表

变压比 一次/二次	$U_{空}$ /V	$U_{负}$ /V	$I_{发}$ /A	$P_{发}$ /kW	cosϕ	$I_{激}$/A 空载/负载	电容量 /kvar	备　注

一般情况下，电容不足时，发电机负载电压 $U_{负}$ 比 $U_{空}$ 要下降许多（用发电机放大机时），而发电机电流 $I_{发}$ 很小，cosϕ 表指针在电感性（滞后）；激磁电流表则在负载时电流 $I_{激}$ 上升。随着逐步增大接入电容量，$I_{发}$、$P_{发}$ 均上升，cosϕ 表指针

从滞后趋向于 1 及超前。

2）判断规范，确定增减变压比。当逐步接入电容，cosϕ 表指针从滞后走向超前 0.9 时，发电机电流 $I_{发}$ 与发电机功率 $P_{发}$ 均会逐步增加。然后，将发电机空载电压 $U_{空}$ 上升到额定值，如果此时发电机电流低于额定值，同时激磁电流表在负载时，电流下降，则表示变压器一次绕组匝数太多，应减少一次绕组匝数；反之，如 $I_{发}$ 超过额定值或 $U_{负}$，低于 $U_{空}$，而 $I_{激}$ 在负载时增大，则表示应增加一次绕组匝数。

此种调谐，可简单归纳为下面三种：

①　发电机电流达到额定值，而负载电压低于额定值，这种情况下，要增加一次圈匝数。

②　发电机负载电压达到额定值，而发电机电流低于额定值，这种情况下，要减少一次圈匝数。

③　发电机负载电压及电流均接近或达到额定值，表示变压比正合适。

当变压器一次绕组匝数已调到最高匝数而仍不够需要时，可以在一次绕组前串接一个可调匝数的抗流线圈。抗流线圈可用纯铜管绕制，中间通水冷却，空心线圈的内径常用 200 ~ 300mm，匝数为 7 ~ 15 匝，备有一些抽头供调整用。附有抗流线圈的中频主电路如图 5-8 所示。

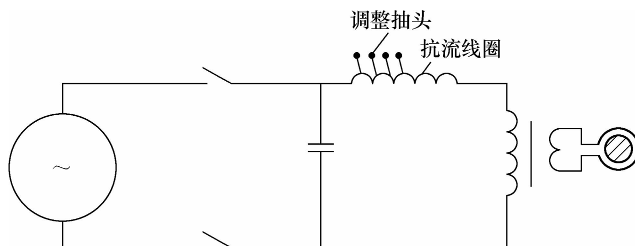


图 5-8　附有抗流线圈的中频主电路

当变压器一次绕组匝数已减到最低值，而电压仍高于额定值时，要改变变压器二次绕组匝数为 2 匝，必要时变压器二次绕组可为 3 匝，变压器一次绕组匝数一般不要低于 7 匝，因为一次绕组匝数太少时，会使一次绕组电流太大。从两种匝比来看，7/1 与 14/2 其匝比值相同，但后者一次绕组电流比前者为小，应采用后者为合理。

125. 如何调整固态感应加热电源设备的电规范?

固态感应加热电源电规范的调整要求如下：

1）电流频率不超过极限值，设备不过载。

2）逆变器与负载要相匹配，使电源能输出全功率。

固态感应加热电源的调整与中频发电机相似，主要是选择合适的变压比与接入适量的电容。其调整规律见表 5-5。

表 5-5　固态感应加热电源负载匹配

负载状态	匹配变压器二次电压	变压器一次绕组匝数	匹配电容量
直流电压低、电流高，低阻抗 Z	↘降低	↗增加	调整
直流电压高、电流低，高阻抗 Z	↗升高	↘减少	调整
低频率（f 达下限）		↘减少	↘减少
高频率（f 达上限）		↗增加	↗增加

固态电源调整时，频率会根据负载情况而变动，这是与中频发电机所不同的。

现以 40TQ25 固态电源为例，额定功率为 40kW，频率为 20～25kHz，其淬火变压器有 8 个变压比：5/1、6/1、7/1、8/1、10/1、11/1、13/1、15/1；电容量在 160～400kvar 内，分级调整，每级可调整 25kvar。

调整步骤如下：

1）先接入部分电容，约 295kvar。

2）在感应器接头处，用电感电桥测量线圈的电感。

3）将测量出的电感值（μH）代入下式，计算变压比：

$$变压比 = \sqrt{\frac{27}{线圈电感}}$$

例如：用电感电桥测出线圈电感 = 0.25μH，代入上式，得

$$\sqrt{\frac{27}{0.25}} = \sqrt{108} = 10.4$$

则最近似的变压比为 10/1 或 11/1。

如不能测量线圈电感，可选用 15/1 变压比进行试调。图 5-9 为固态电源调整流程图，从图的顶部方框“发电机对负载不适合”处开始，棱形框内的文字是所提的问题，根据“是”或“非”所指的矩形框子里的答案进行调整。从流程图可看出：① 当频率高于上限时，要增加电容或增加一次线组匝数；②当频率低于下限时，要减少电容或减少一次线组匝数。

现代感应淬火设备采用 CNC 控制。在电规范调整方面，有些控制系统中设置有菜单，电规范的调整更加简便。

126. 如何在加热过程中保持较稳定的输出功率？

感应加热过程中，工件因温度升高，过了居里点失去磁性，负载产生变化，加热功率会下降。

1）对中频发电机采取的措施是在加热过程中附加电容。一般此法应用于加热时间较长的大工件，如大齿轮、飞轮齿圈等。其方法是在淬火机上增加附加电容与相应的带灭弧罩的接触器，当工件加热到磁性转变点后，发电机电流及功率均下降，$\cos\phi$ 指针往电感性方向转。此时，将已匹配好的电容量附加上去，发电机电

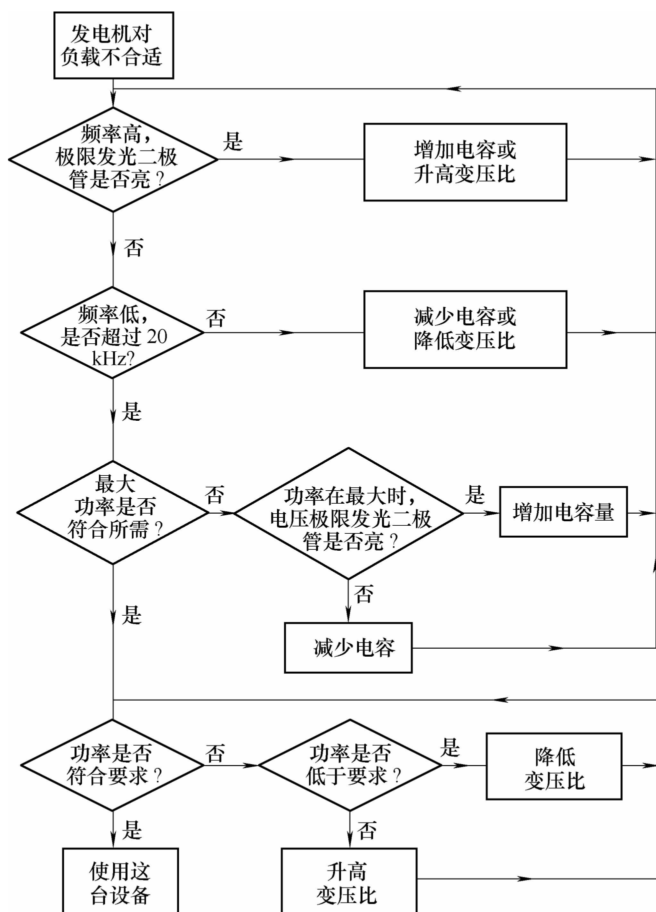


图 5-9　固态电源调整流程图

流及功率即上升一定数值，此法称附加电容法，如图 5-10 所示。

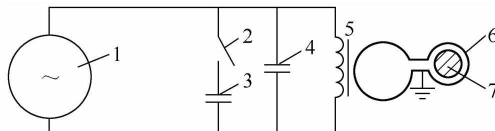


图 5-10　加热过程中接入附加电容
1—中频发电机　2—接触器
3—电容器（可调）　4—电容器
（固定式）　5—中频变压器
6—感应器　7—工件

2）对高频设备采取的措施是在加热的过程中改变负载电感。其方法是增加一个辅助电感，如图 5-11 所示。当开始加热时，辅助电感与感应器是串联的；到了居里点以后，由螺旋线圈控制的铜分路器插入原来分断的汇流排，辅助电感被短路，负载匹配状态即改变了，输出功率可以增加。辅助电感短接前，应先使加热断开。

127. 如何调整感应淬火工艺规范?

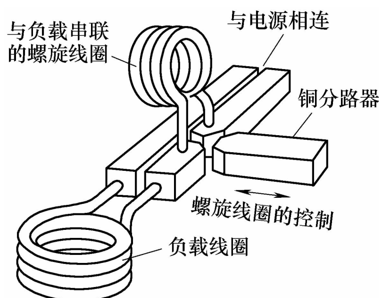


图 5-11　增加辅助电感改变负载匹配

（1）加热　其目的是使工件表面达到合适的淬火温度，并达到一定的加热深度。可以用以下两个公式来概括淬火规范的调整：

$$v_{相} = f(P_0) \tag{5-1}$$

式中　$v_{相}$——相变区的加热速度（℃/s）；

P_0——功率密度（kW/cm^2）。

$$t = f(\tau) \tag{5-2}$$

式中　t——工件最终加热温度（℃）；

τ——加热时间（s）。

式（5-1）说明，工件在相变区的加热速度，取决于功率密度的大小（是功率密度的函数）。式（5-2）说明，当工件加热速度确定后，工件最终加热温度，取决于加热时间（是加热时间的函数）。热处理加热规范的调整，实际上是按以上两个公式的先后次序进行的，即先选择功率密度，再选择加热时间。

在电源设备的频率、功率选择得比较适合的情况下，为提高生产率，一般将电源的输出功率尽量调大一点，如 80%～90% 额定功率。这样，$P_{发}$ 确定了，P_0 和 $v_{相}$ 也确定了。此时，可用红外辐射高温计测量工件表面温度（有经验的工作人员用目测也可以），同时用秒表记下加热时间 τ，此时最终加热温度 t 被确定下来。

工件调试一般用三个工件：第一个工件加热时间用 τ；第二个工件用 $\tau+X$；第三个工件用 $\tau-X$。这样工件加热温度有中、上、下范围。如果用高温计测出的温度正确的话，将得到如下的金相检验结果：第一个工件，淬火温度合适，淬火组织为马氏体；第二个工件淬火温度偏高，显微组织为中针状或粗针状马氏体；第三个工件淬火温度偏低，显微组织为不均匀的马氏体，伴有未溶铁素体。此时，如果第一个工件硬化层深度也符合要求（最好为中间值），调试就算合格；如果硬化层太深，则应提高功率密度 P_0，缩短加热时间 τ，重新进行调试。在高温计监测下，调试一个工件即会达到预期目的；如果硬化层深度太浅，则应降低 P_0，同时延长 τ 进行再一次调试。

当采用扫描加热时，可以改变托架移动速度 v，即改变了加热时间，因为 $\tau = H/v$，H 为有效圈高度，是固定的；也可以改变 $P_{发}$，亦改变了 P_0 与 $v_{相}$。

根据工件硬化层深度来调整 $P_{发}$ 与托架移动速度 v。

（2）冷却　工件快速加热后，要立即快速冷却的目的，是为了工件表面能淬上火。

1）对于中碳钢，最方便、价廉的淬火冷却介质是水，并且常用喷水冷却。喷水时，冷却速度极大，用细热电偶焊在加热工件表面，然后用示波器记录下来冷却时的温度曲线如图 5-12 所示。从图上可看出，$A \sim B$ 段冷却速度极快，约 2900℃/s；温度降到约 200℃（C 点）后，冷却速度大大降低，起初为 100℃/s，以后逐步

降低。

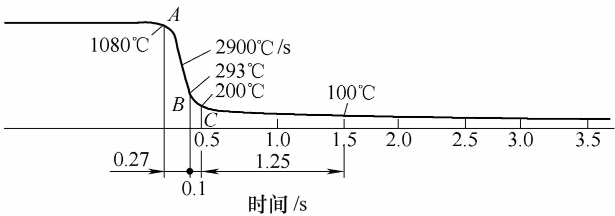


图 5-12　工件喷水冷却时的温度曲线

2）对于易淬裂的碳钢工件及合金钢工件，旧工艺用油淬、喷油淬，现在已广泛应用聚合物作添加剂的淬火液。国外产品有 Ucon、251、364 等，国内也有多种产品。这种聚合物淬火液的质量分数为 5% ~15%，温度常控制在 15 ~50℃。

感应淬火工件的表面颜色，常能告诉我们加热温度是否正确。当工件淬火后，表面出现蓝色，一般提示加热温度不够；当淬火后，工件表面全部呈现灰白色，一般表示加热温度过高；正常淬火表面应呈现点状米色，并具有淡黑色不连续的氧化皮。

128. 如何调整感应淬火后的回火工艺规范？

感应淬火后，为降低零件淬火应力及达到所要求的合适硬度，零件一般需经回火处理。

常用的回火有以下三种方法。

（1）炉中回火　适用于小零件、油中淬火及浸液淬火零件。为了避免零件在淬火后因内应力太大而产生的开裂，一般应及时进行回火。

回火温度根据零件技术要求而定，一般要求在 52HRC 以上的，回火温度用 180 ~200℃，回火时间为 1.5h；对于要求 56HRC 以上的，回火温度可用 160℃，回火时间为 1.5h。

（2）自回火　利用零件心部余热将淬硬表面加热回火，称为自回火。

工件感应淬火并自回火过程温度曲线如图 5-13 所示。

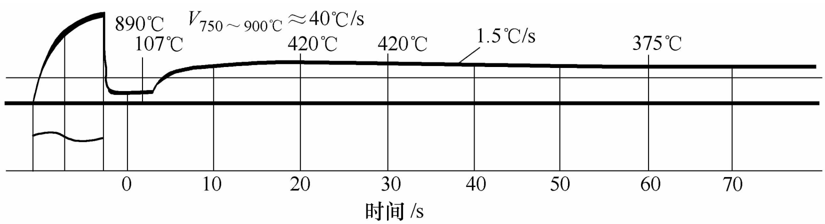


图 5-13　工件感应淬火并自回火过程温度曲线

自回火的主要优点为节能、减少劳力，并有防止因回火不及时产生开裂的效果。

自回火适用于大量生产，如半轴感应淬火自动线上，对半轴进行自回火，经过几个节拍后，半轴再一次冷却，以便进行下一道工序加工。自回火并不能适用于所有感应淬火零件，如浸液淬火的零件与连续淬火的零件，就较难实现自回火；对有些零件由于淬硬表面与非淬硬表面交界处出现回火不足，称边缘效应。这种情况是不适合自回火的。这时，淬硬表面与未淬火表面交界处的硬度比中心区域为高。

自回火温度的测定，常用的有三种方法：

① 测温法：淬火工件冷却刚结束，立即用红外辐射高温计对准被测表面，稍后即会出示自回火的最高温度点，然后逐渐降低直至室温。

② 硬度降低法：将几个相同零件用相同的加热规范加热，而用不同的冷却时间冷却，则几个零件表面硬度将是不同的，冷透的零件硬度最高，喷水时间最短的零件硬度最低。如果零件表面没有贫碳或脱碳等其他因素干扰，则喷水时间短的零件表面硬度降低的原因是由于自回火。实践证明，利用硬度降低数值，可以核算其相应自回火温度。表 5-6 列出了 45 钢自回火与炉中回火获得相同硬度时的相应温度。

表 5-6 获得相同硬度的自回火温度与炉中回火温度的对比（45 钢）

平均硬度 HRC	温度/℃		平均硬度 HRC	温度/℃	
	炉中回火	自回火		炉中回火	自回火
63	100	185	52	305	390
61	150	230	48	365	465
57	235	310	42	425	550

③ 氧化色法：将刚停止喷水的零件表面，用锋利的锉刀锉一下，露出金属本色，当内部热量传出后，原为本色的金属表面开始氧化，从浅黄（200℃）、黄色（220℃）、深黄（240℃）、黄紫（260℃）、深紫蓝（280℃）至蓝色（300℃）等，可以大致确定自回火温度。此法适用于回火温度较高的零件。

自回火的延续时间，工厂中一般在喷水停止后，让零件自回火并在空气中自然冷却到室温。对于自动线生产，为及时进行下一道工序加工，可采用第二次冷却。试验已证明，零件硬度的降低程度是衡量残留应力降低程度的指标。当自回火时间超过 30s 后，再延长时间，实际上已不再改变内应力及硬度。

（3）感应回火 感应回火分工频感应回火与高、中频感应回火两种。工频感应回火的生产实例，如气缸套；高、中频感应回火的零件很多，如丝杠等零件。感应回火的优点是节能，设备较小，便于流水线生产；缺点是专用性较强，需要专用的感应器，因此，适用于大批量生产。

129. 工艺调试的试样是否必须与生产件尺寸完全一致？

感应淬火工艺调试的试样特别是大工件，常常用特制的加工样品来进行，如大型曲轴颈等，但材料、尺寸必须完全相同。如果轴颈圆角也要淬火，则相邻的轴颈

部分也必须附带上，否则调试结果会有差异。对小试样，有些调试人员为节省样品，常常用前工序的机加工废品，此时必须保证淬火部位尺寸完全一致；定位基准有牵连的，如中心孔大小或定位尺寸已变等，则必须采取措施，使试样与工件淬火部位尺寸完全一致，否则淬硬区会偏移。

130. 在什么情况下使用比 2 连接板或变压器多匝二次绕组？

中频淬火变压器的一次绕组匝数很多，有的多达 34 匝。由于多匝感应器与组合式有效圈的应用，感应器的阻抗向高阻抗发展，直径小、宽度大的低阻抗有效圈渐趋淘汰。例如，20 世纪 50 年代，汽车钢板弹簧销子一次加热淬火感应器（$D_{内}=26\text{mm}$，$H_{感}=90\text{mm}$）是低阻抗单匝感应器，所需感应器端电压在 20V 左右(8kHz 时)。由于感应器电压低，电流大，因此损耗也大（当时一汽中频发电机采用的是 375V 发电机电压，18∶1 匝比)。现在这种感应器已发展为多匝感应器，而中频变频机的输出电压大都采用 750V 或 650V。输电电压升高，减少了电路损耗，感应器电压提高了。同样，减少有效圈电流与损耗，要使中频变压器二次绕组上得到高的输出电压，只有减少一次绕组与二次绕组的比值；但是一次绕组匝数越少，在额定输出电压下，振荡电路电流就越大。因此，变压器一次绕组的匝数减少是有限的。如果一次绕组匝数不减，增加二次绕组的匝数，同样提高了变压器的输出电压。这就是采用多匝二次绕组或比 2 连接板的理由。

拖拉机气缸套淬火变压器合适的变压比曾试用过 19∶2 和 10∶1 两种规格。在中频发电机 750V 输出电压下，感应器端电压基本相同；但采用 19 匝一次绕组时，变压器一次绕组的电流值小于 10 匝一次绕组的，变压器损耗减小了。GM 公司合金铸铁凸轮轴感应器是 8 匝串联，所需感应器电压特高，就选用了 22∶6 匝比的中频变压器。它的优点是一次绕组匝数多，减少了变压器的损耗，二次绕组多达 6 匝，感应器电压高又减少了感应器的损耗。

现在国内 IGBT 超音频电源输出电压较低，常不超过 650V，而由于频率比中频 8kHz 高，同一感应器在超音频频率下，阻抗增大，所需感应器电压就提高了。因此，采用 2 匝的二次绕组的概率就增大了。目前，国内产品中频变压器二次绕组是可以为 1 匝或 2 匝的。当采用 2 匝绕组时就必须采用比 2 连接板，如图 5-14 所示。

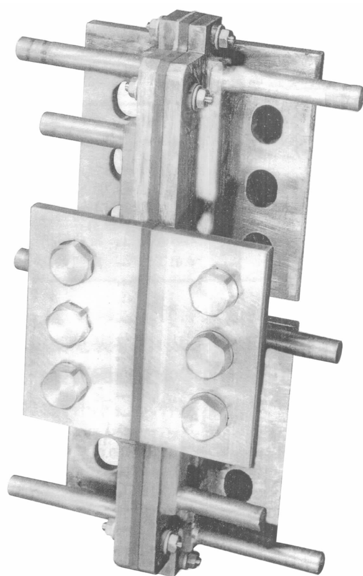


图 5-14　比 2 连接板

131. 功率分配器有何功能？常用在什么零件上？

所谓功率分配器，就是在旋转加热时，当半环型感应器处于轴颈上止点时，它所施加的功率比它位于下止点时的功率为小，这样调整了原来上止点温度高与下止点温度低的缺点。有一种功率分配器是一组限位块与一组接近开关相组合的机械装置，随着曲轴的旋转，托架作升降运动，固定在托架上的限位块使接近开关动作，接近开关控制中频功率的大小，这样可以在轴颈的每个回转过程中，改变它的功率，一般上止点位置的功率比下止点位置的功率小30%左右，根据具体情况调整确定。图5-15所示为曲轴颈采用功率分配前后的淬硬层图形。另一种功率分配器是随着轴颈旋转，每转15°增加或减少一定量的功率，国内感应加热公司已能制造出这种功率分配器。

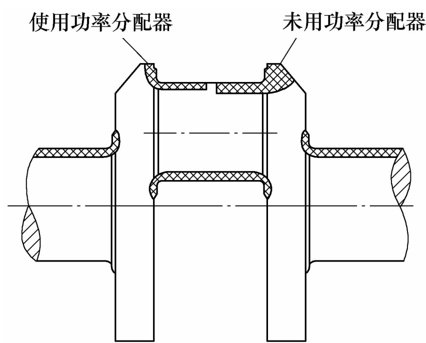


图5-15　曲轴颈采用功率分配前后的淬硬层图形

132. 曲轴颈感应淬火有哪几种工艺方法？

曲轴颈感应淬火有以下四种淬火工艺：

1）曲轴不旋转，用开合型感应器套在需加热的轴颈上加热，并进行喷液淬火。后来，又研制出半自动曲轴淬火机床，进行大批量曲轴颈淬火，优点是劳动强度低，缺点是淬硬区不均匀，如连杆轴颈上止点处淬硬层宽，下止点淬硬区窄等。此工艺已沿用60年以上，现在某种汽车曲轴、拖拉机曲轴还使用此工艺生产。

2）曲轴旋转加热，采用半环型感应器，在半自动或全自动曲轴淬火机床上进行批量生产，其优点是淬硬区温度均匀，宽度上通过功率脉动等技术达到一致，最大优点是能进行轴颈圆角淬火，提高曲轴的疲劳强度，是目前应用最广泛的曲轴淬火工艺。

3）曲轴不旋转，采用半环主线圈与半环副线圈耦合加热曲轴颈，称为Sharp-c工艺。其优点是加热时间短，一个轴颈加热时间在4s左右，设备占地面积比旋转淬火装置小，感应器寿命长等，但此工艺未解决曲轴圆角淬火技术。

4）曲轴旋转淬火，采用一种双半环型感应器，几乎将曲轴颈全部包住此工艺的优点是加热效率高，时间短。目前，只应用于轿车曲轴，属日本某公司专利。

133. 曲轴颈圆角感应淬火工艺是怎样的？

早期感应淬火的曲轴颈不管是主轴颈或连杆颈均只淬轴颈的中间区段，如图5-16所示。这样轴颈的表面硬度和耐磨性增高了，而对轴颈弯曲疲劳强度没有作用，特别是轴颈两侧过渡区还存在拉应力，对曲轴的疲劳强度是不利的。要使曲轴疲劳强度提高的关键是提高轴颈圆角处的残留压应力。日本一家公司曾对内燃机曲轴进

行了一系列的弯曲试验。试验证明，圆角感应淬火的曲轴具有最高的疲劳强度（996MPa），圆角滚压曲轴的疲劳强度第二（890MPa），渗氮曲轴位列第三（720MPa）。美国DDAD公司通过疲劳试验样品检测得到当圆角部分淬硬层为100%马氏体时，具有最高的疲劳强度（接近1034.9MPa）。

因此，曲轴颈圆角感应淬火成为重载内燃机曲轴的主要热处理工艺，曲轴颈圆角感应淬火工艺的关键如下：

1）使用曲轴圆角淬火感应器，以保证轴颈及圆角处达到技术要求（淬硬层深度及区域）。

2）采用功率脉动技术，使上、下止点区温度保持一致。

3）控制曲轴感应淬火时产生的畸变，因为圆角感应淬火后不宜校正且极难校正，校正会产生裂纹或断裂。控制畸变有许多解决方案，图5-17所示为曲轴颈圆角淬火的部分技术要求。

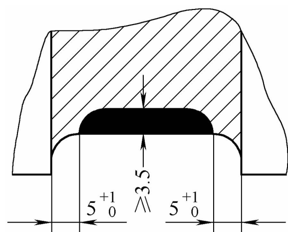


图5-16　曲轴颈圆角不淬硬的技术要求

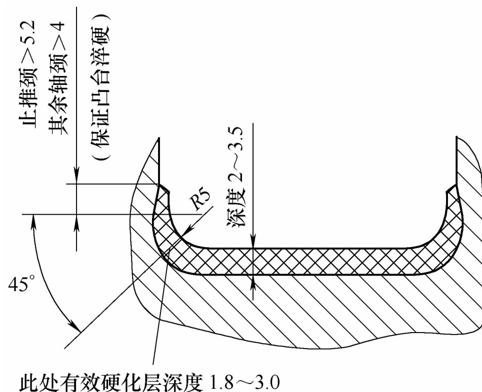


图5-17　曲轴颈圆角淬火的部分技术要求

曲轴材料常用45钢、40Cr、42CrMoA、QT700-2、QT800-2等。由于曲轴颈圆角淬火能提高曲轴的疲劳极限，现代发动机曲轴的轴颈淬火技术要求，大部分要求圆角淬硬。曲轴颈淬硬部位，以6缸曲轴为例，常有14或15处之多，即6个连杆轴颈，7个主轴颈与1个油封法兰（或增加1个前轴端油封部分）。

1）在电源频率选取上，轴颈淬硬普遍用8～10kHz电源。由于油封法兰硬化层深要求浅，常为1.0～1.5mm。目前趋势是以采用比轴颈频率高的超音频30～40kHz为主流。轴颈连圆角部分采用一次旋转加热，油封法兰采用一次加热或扫描加热淬火。回火工艺不管是浸液淬火或喷液淬火，均采用炉中回火工艺。不用自回火工艺的原因，主要是自回火不能保证在复杂的截面上温度分布均匀。为了减少回火炉占生产线场地的面积，回火炉采用塔形结构。曲轴通过输送链从下向上，再由上而下，达到工艺规定的回火时间后出炉。

2）曲轴颈淬火前，一般需经清洗与校直，圆跳动公差不大于0.1mm；淬火后中间轴颈圆跳动公差一般小于0.3mm或0.4mm。圆角淬火曲轴颈，淬火后一般不允许校直。

3）为了保证不产生淬火裂纹，即使是45钢，现在也较多地采用了质量分数为4%～6%的聚合物淬火液。

4）连杆颈淬火时，采用功率分配器，使上止点处功率比下止点处功率低20%～30%，能使上、下止点处温度均匀，并且使硬化区宽度一致化，否则下止点（曲拐内侧）硬化区会变窄。

5）曲轴颈因淬火质量不符合要求而返修时，应先经高温回火，或对该轴颈进行正火处理，以消除应力，否则重淬时易产生裂纹。

6）曲轴颈淬火后未裂，而在精磨时出现裂纹，除在磨削加工工艺上找原因外，感应淬火回火工艺也要进行分析，查找相关因素。特别是表面硬度明显过高，则证明回火温度不足。

134. 凸轮轴感应热处理工艺是怎样的？

发动机凸轮轴感应淬火的电源频率，现在以8～10kHz为主流，功率则常用200kW左右。凸轮轴电源频率的选择，主要取决于凸轮的几何形状。早在20世纪50年代，前苏联高尔基汽车厂曾用2000Hz、200kW机式发电机，一次加热两根凸轮轴的凸轮。当加热5.0～5.5s时，凸轮的圆弧部分高于中碳钢的淬火温度，而桃尖部分加热不足，必须预冷4.5～5.0s，才能使桃尖与圆弧部分温度均匀，而每根凸轮轴的耗电量为3.25kW·h。当采用3600Hz、200kW机式发电机进行凸轮加热时，凸轮加热时间为3s，预冷只需2.5s，整个凸轮加热温度均匀，每根凸轮轴的能耗降到1.9kW·h。当采用8kHz机式发电机时，在175kW功率时，加热时间为3s，预冷1s，冷却2.0s，生产率明显上升，而能耗下降。凸轮用不同频率电源时的生产率与能耗数据见表5-7。

表5-7 凸轮用不同频率电源时的生产率与能耗数据

电源频率/kHz	功率/kW	加热时间/s	预冷时间/s	冷却时间/s	生产率/(件/h)	能耗/(kW·h/件)	特点	备注
2.0	200	5.0～5.5	4.5～5.0	5.0	36	3.25	桃尖温度低	采用双位淬火机，凸轮轴共有两个凸轮同时加热
3.6	200	3.0	2.5	2.5	60	1.9	温度整个均匀	
8.0	175	3.0	1.0	2.0	80	1.6	桃尖温度略高	

用高频、超音频电源加热凸轮，尽管采取桃尖部加大间隙等措施，凸轮桃尖部温度仍然明显高于圆弧部，此种工艺已经被淘汰。

（1）凸轮加热电流频率的选择　在没有计算机模拟办法时，曾推荐$f_{最佳}$（Hz）

的计算式为：$f_{最佳}=3800/r^2$，式中，r 为凸轮桃尖的 r 值（cm）。以 4125 发动机凸轮轴为例，凸轮圆弧部直径≈34.9mm，进气门 $r\approx4.14$mm，排气门 $r\approx6.16$mm，按上式计算：$f_{最佳}=3800/(0.6)^2$Hz = 10555Hz。

这种凸轮，在采用 2500Hz 加热时，桃尖温度明显低于圆弧部，工艺上靠预冷匀温来提高桃尖的温度，然后进行喷液淬火。

（2）凸轮感应淬火工艺　基本上有两类：分段一次加热方法和整根凸轮轴一次加热方法。

1）钢制凸轮轴，凸轮与轴颈一般采用分段一次加热方法。凸轮与轴颈宽度相近时，可以共用一个感应器。解放牌汽车凸轮轴，凸轮、轴颈、偏心、齿轮四个不同部分，共用一个感应器，使用效果不错。此工艺的难点在于离轴颈很近的这个凸轮的淬火加热，当采用 8 ~ 10kHz 电流时，感应器的电磁场一部分会散逸到紧邻的轴颈，这样，轴颈局部会回火，而凸轮靠轴颈侧这一部分加热温度偏低。现在凸轮感应器两端已设计装上导磁体，解决了此一难点。

凸轮轴工艺上碰到的第二个难点，是两个相邻凸轮距离太近，如相距 6 ~ 8mm。此时，感应器附加导磁体也有困难。解决的办法是将两个相邻凸轮一起加热，但由于感应器中间磁场较强，因此，感应器设计上要使并联的两个有效圈在中间部分离得远一些，并不完全与凸轮宽度相对应。

2）对于轿车合金铸铁凸轮轴，一般采用多个感应器串联、一次加热整根凸轮轴的工艺。

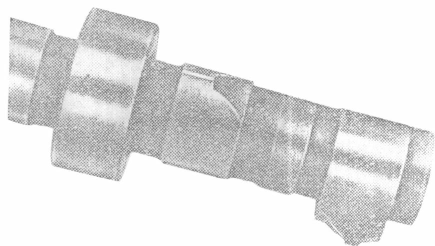


图 5-18　凸轮尖端部分崩落

（3）回火　采用分段一次加热的凸轮轴，常采用自回火工艺。此时，淬火工艺应设定为每加热淬火凸轮轴的一个部分，下一个加热部分应位于已淬过火部分下面的位置。这样能保证已淬过火的部分不必受第二次冷却，就有可靠的自回火温度与时间。凸轮常因自回火温度不足，在下一工序前后会发现凸轮尖端部分崩落，如图 5-18 所示。有时会产生许多件同样崩落形式的废品，有时因感应器与加热部位位置的偏移，也会产生废品。

（4）淬裂　由于钢制凸轮轴淬火表面硬度要求较高，因此，比较容易产生裂纹。有些厂家对凸轮轴钢材碳含量进行精选，缩小上下限差，如 45 钢，精选 w（C）为 0.42% ~ 0.47%，或 0.43% ~ 0.48%。

（5）凸轮轴的变形　对于分段一次加热的凸轮轴，淬火后有弯曲，但易于校正，因为杆部未淬硬；但对多个凸轮一次加热的凸轮轴，由于未淬硬的杆部极短，在可能条件下，采用校正辊，可减少变形。

135. 气缸套感应热处理工艺是怎样的?

发动机气缸套的工作条件是处于较高温度、半干润滑状态，并且受到活塞环的强烈摩擦，因此，缸套表面应有较高的硬度；缸套还承受着交变的负荷，所以在硬的表层下应有韧性的金属。过去，气缸套是采用整体淬火工艺，后来采用感应淬火工艺。采用感应淬火的优点是：①它可以在流水线上生产，而且生产率比整体淬火提高许多倍；②节能；③硬化层深度可以根据需要来选定。

气缸套一般用珠光体灰铸铁制造，其铸态组织有较严格的要求。铸件硬度为 170～241HBW，缸套淬火硬度一般要求≥43HRC，硬化层深度为 1.5～2.5mm，淬硬区在两端允许有过渡区，如上端≤15mm，下端≤25mm 等。

（1）感应淬火　根据硬化层深度，可选用超音频或中频 8kHz 的电源；功率根据缸套直径大小而定，如内径为 125mm、高度为 292mm 的缸套，选用 160～200kW 功率即可。当采用双工位交替工作的淬火机时，生产率可达 90 件/h。扫描淬火时，加热温度与时间对淬火后果有很大影响，生产中采用的扫描速度为 6～7mm/s，即每质点的加热时间为 3s 左右（有效圈宽度为 20mm），加热温度为 900℃左右，能得到较好的淬火结果（细针状马氏体与托氏体组织）。

（2）回火　气缸套的回火采用工频回火机。三工位工频回火机一次可进行 3 件缸套回火，旋转工作台上以 3 个为一列对称地布置着 6 个缸套，工作台可以往复回转 180°。当第一列 3 个缸套在进行工频回火时（回火温度一般在 200～220℃，回火时间一般在 40s 左右），另一列的 3 个空位上可以装上待回火缸套。当第一列缸套完成回火后，工频回火线圈自动上升，工作台回转 180°，线圈下降，开始进行第二列 3 个缸套的回火。工频缸套回火感应器内置硅钢片芯，线圈由多层、多匝扁铜线制成，其生产率超过淬火机 90 件/h 的生产率，达 180 件/h，可以配套进行生产组合，布置在生产线上。

136. 飞轮齿圈感应热处理工艺是怎样的?

汽车、拖拉机发动机的飞轮齿圈常用 45 钢制造。飞轮齿圈在发动机起动时，由接合齿轮带动旋转，齿面经受摩擦与冲击，因此齿面淬火能提高耐磨性。

以 ЗИС-150 汽车飞轮齿圈为例，45 钢制齿圈，经感应淬火并自回火后，齿面硬度为 54～56HRC（技术要求 48～60HRC）。此齿圈在具有起动装置和强力弹簧（300N）的台架上试验轮齿的耐磨性，经过 10 万次试验（相当于汽车跑 100 万 km）后，磨损还很少，并且可以继续使用。

（1）飞轮齿圈感应加热电源的选择　飞轮齿圈感应加热电源的选择，主要依据是轮齿的模数、齿圈的外径及宽度。以一种载货汽车飞轮齿圈为例，m = 3mm，齿圈外径为 ϕ325mm，齿根处 D_s 要求 1.0～3.0mm，采用电子管高频电源 100kW，200～250kHz；另一种拖拉机发动机飞轮齿圈，m = 4mm，外径为 ϕ482.6mm，齿部宽 25mm，则采用 8kHz、200kW 中频电源。

目前轿车飞轮齿圈采用高频电源 100kW 的为多数，而拖拉机飞轮齿圈，采用 8kHz 及超音频电源的均有。

以上几种飞轮齿圈淬火后，齿部基本淬透，齿根处有硬化层，硬化层深度 > 1mm，如图 5-19 所示。这种淬火方法得到的是全齿硬化，齿根处有硬化层，为提高轮齿的韧性，拖拉机飞轮齿圈将淬火硬度要求设定为 41 ~ 49HRC。飞轮齿圈用现代技术双频淬火，将得到沿齿廓分布的硬化层，结果会更好，但投资费用极高。

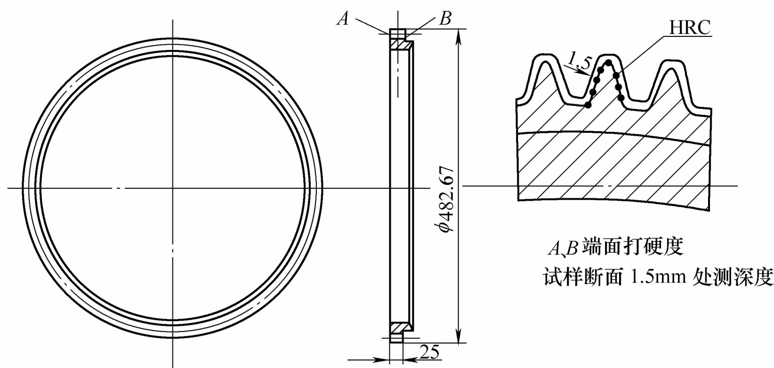


图 5-19　飞轮齿圈齿面淬火后齿根处的硬化层

（2）飞轮齿圈的感应淬火工艺　齿圈采用一次加热、旋转淬火；加热后一次喷液，控制喷液时间，以得到自回火。淬火冷却介质一般用 15 ~ 30℃ 的水。

喷液有两种方式。第一种方法是感应器有效圈上钻有喷液孔，加热到温并预冷后，直接喷水数秒，停喷，让齿圈心部热量传到外表面，使轮齿进行自回火。自回火温度根据硬度要求在 300 ~ 400℃ 之间。飞轮齿圈采用自回火的最大好处除节能外，由于及时回火，对防止齿部淬裂是十分有效的。值得注意的是，感应器喷液孔径随生产时间的增长，容易逐步减小（与水的硬度含 $CaCO_3$ 有关）。因此，按照规定工艺生产一段时间后，常会发现自回火温度升高了。其原因是喷水孔截面减小，导致喷液量减少。为此，这种感应器必须定期用质量分数为 10% HCl 溶液酸洗，去除喷液孔上的水垢。

第二种方法是齿圈用圆环感应器加热，加热预冷后，齿圈落入喷液器中，进行淬火并自回火。这种方法加热后，工件必须正确落入喷液器中。这种感应器使用寿命较第一种为长，但多了一个下降动作。有个内燃机厂试验结果认为齿圈浸淬，因内圈与外圆同时冷却，其变形比喷液的为小。

137. 半轴感应热处理工艺是怎样的?

发动机动力通过变速器、后桥，经半轴传到车轮，使车轮承受扭转力与冲击。早期半轴采用调质处理。现在半轴绝大部分已采用感应淬火工艺。半轴法兰与杆部硬化层的连续与否，以及杆部硬化层深度与直径之比，是提高半轴疲劳强度的关

键。半轴一般采用 40Cr、40MnB 与 42CrMo 钢制造。

半轴感应淬火的方法，一般有扫描淬火法与一次加热法两种。扫描淬火法适用于多品种的批量生产；一次加热法一般适用于在专机上进行大批量生产。从生产率、淬火质量、节能效果与生产成本进行比较，一次加热法比扫描淬火法为优，但需要大功率电源、大流量水泵，且专用感应器结构也较复杂，所以一次投资费用很大，只适用于大批量在线生产。

（1）半轴扫描淬火法　一般采用立式通用淬火机或专用淬火机。半轴感应器的结构，要能首先加热法兰面到淬火温度，然后对杆部与花键部进行扫描淬火，如图 5-20 所示。

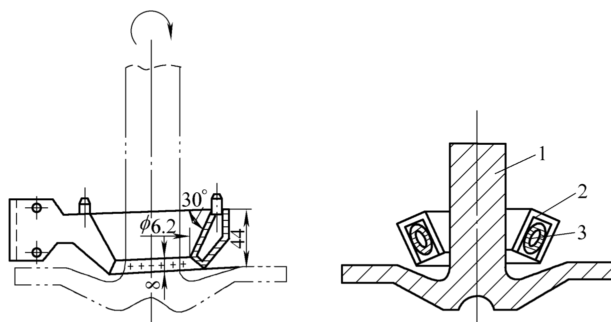


图 5-20　半轴扫描淬火示意图

1—半轴　2—导磁体　3—感应器

现代半轴淬火的技术要求，对法兰面淬火通常规定，法兰面淬火直径不小于 ϕxmm，此 x 值越大，对感应器的设计要求越高。同时由于加热法兰面时，工件不移动，因此靠近法兰 R 处的杆部，其加热总时间较长，即等于法兰加热时间加上扫描加热时间，因此该区段硬化层特别深。

半轴扫描淬火时的另一特点是，当扫描淬火到杆部与花键过渡段时，有效圈上的磁力线常会产生偏移，即杆部未加热到过渡区段，而花键部已加热（此现象当花键外径比杆部外径大得越多时，越显著）。工艺上常采用在此过渡区段降低扫描速度的办法，使该段温度通过传导而均匀。半轴扫描淬火后，由于没有自回火形成，因此需要补充回火，回火工艺常采用感应回火。图 5-21 示出半轴杆部与花键连接区段的磁力线偏移。

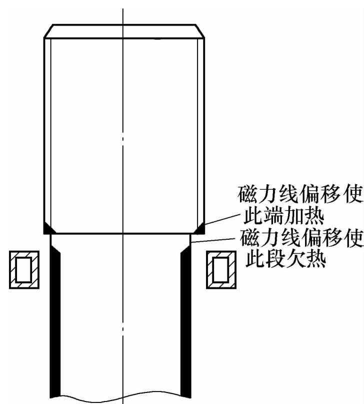


图 5-21　半轴杆部与花键连接区段的磁力线偏移

（2）半轴一次加热淬火法　将整根半轴的淬火区域一次进行加热，是一种先进的工艺。它采用两根上面装有导磁体的矩形有效圈加热杆部与花键部，法兰部的有

效圈呈半环形，而轴端一侧，当半环因周长太短而不能得到合适的硬化图形时，常附加集流器，如图 5-22 所示。

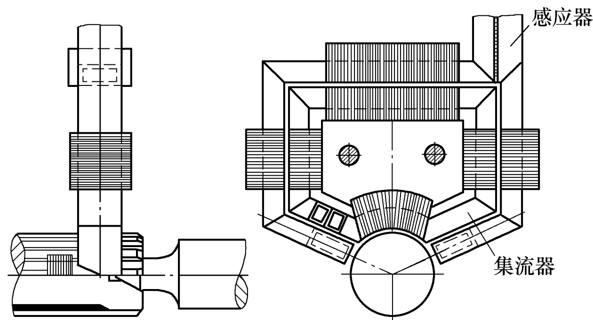


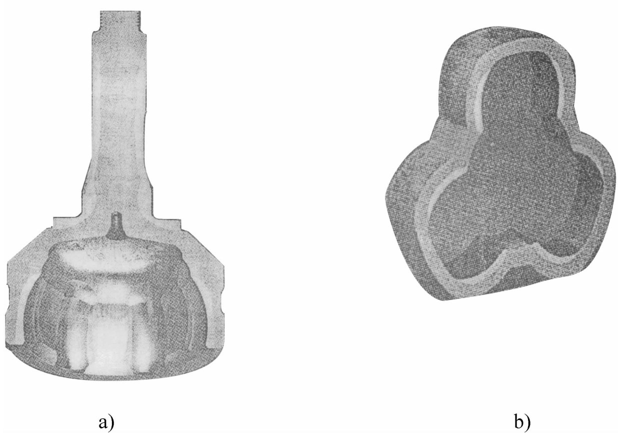
图 5-22　半轴感应器端头附加集流器

半轴一次加热法使用的电源频率常用 4 ~ 8kHz，而功率根据半轴加热面积大小常为 400kW 以上。由于一次冷却面积特别大，因此需配大容量水泵，采用聚合物水溶液，并且采用带校正辊的淬火机床，加热、校正、淬火与自回火一次完成。国内汽车制造厂已成功地将此工艺应用于生产，取得生产率提高数倍、弯曲疲劳强度大大提高，并且节能的效果。

138. 等速万向节钟形壳感应热处理工艺是怎样的?

等速万向节是汽车传递转矩到车轮的重要部件。由变速轴端的滑动万向节、车轮端的固定万向节及中间的传动轴构成。

感应淬火件主要是钟形壳与滑套。钟形壳淬火部分是花键部及内球道，滑套淬火部分是花键部分及滑套的三对滚道沟，如图 5-23 所示。这种零件早期使用的材料是 40 钢，随着对硬度技术要求的提高，现在采用 55 钢等。



a)　　b)

图 5-23　钟形壳和滑套淬火部分剖面图

a）钟形壳　b）滑套

（1）钟形壳感应淬火的电源　由于花键部分淬硬层深，电源频率范围为 3 ~ 30kHz，大多数生产厂家采用 8 ~ 10kHz。电源功率根据零件尺寸可选 100 ~ 300kW，选用频率高的，功率相对可以低一些，现在较多采用 160 ~ 200kW 的电源。

（2）钟形壳花键部分的淬火方式　由于杆部、台阶轴 *R* 处及台阶面均需淬硬，硬化层要求连续，基本上全部采用一次加热法。感应器要保证各部分均能淬硬，特别是 *R* 处要达到一定深度。因此，其结构较复杂，台阶面宽者，有效圈常由多段组成。淬火冷却一般由喷液器进行，有的工件加热后下降，用机床两侧平面喷液器进行冷却，或直接在感应器装置的前、后喷液器进行冷却等多种方式。花键加热与冷却时，工件必须旋转。

（3）钟形壳内球道的感应淬火　一般由内孔加热感应器进行，有效圈镶有导磁体，以提高效率，有单匝与多匝两种结构。多匝感应器的制造比单匝的复杂，但因为多匝感应器的电流比单匝的小，导电管不易烧断，因此这种结构仍在发展之中。工件的冷却，由感应器内的、由绝缘材料制成的喷液器进行。喷液先喷到钟形内腔的底面，再流经滚道面而离开工件。为防止钟形壳变形，加热内腔球道时，外表面有辅助喷液器进行冷却。

钟形壳、花键部分与滚道部分的加热时间，一般在 3 ~ 6s 之间。特别是内滚道，加热时间不能长，以防淬透；内滚道加热与冷却时，工件必须旋转。

（4）滑套滚道沟的淬火　滑套滚道沟淬硬部位主要是三对滚道沟，滚道沟要求耐磨。图 5-24 所示为滑套感应器。

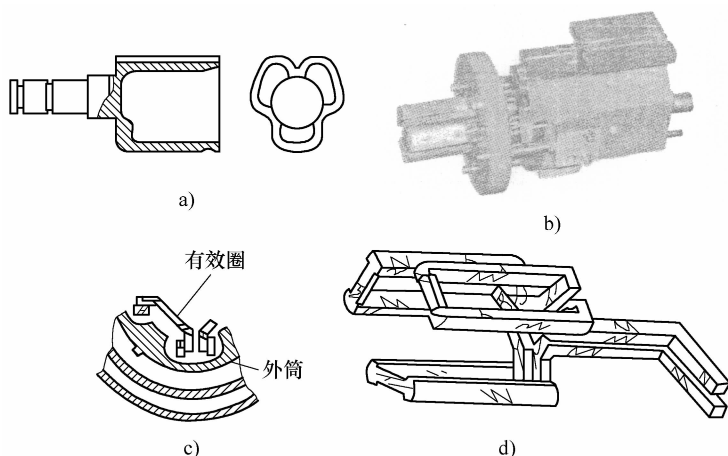


图 5-24　滑套感应器

a）滑套简图　b）滑套感应器外形

c）滑套外筒与有效圈相对位置　d）有效圈结构

滚道沟淬火加热有两种方式：

1）扫描淬火。一般三对滚道沟同时进行扫描，有效圈一般是串联的，并且装有导磁体。由于受滚道沟的结构所限，采用工件垂直移动扫描的方式，封闭端只能处在顶上位置。这种感应器有两个喷液器：一个位于有效圈下面，扫描淬火时喷液；另一个位于有效圈中心，当扫描到近封闭端而停止扫描时，中心喷液器进行喷液，将最后加热段进行淬火。由于滑套局部壁厚极薄，因此扫描加热的同时，外部有辅助喷液器进行冷却。

滑套扫描淬火对机床和感应器制造精度均有严格要求，对感应器冷却水流量及淬火液流量均有要求；否则，三对槽的硬化层不能一致。滑套进入感应器时，其定位角度必须准确；否则，会碰坏感应器。这种感应器的造价是十分昂贵的，比半环形曲轴感应器的制造精度及复杂度还要高。

2）一次加热淬火。滑套一次加热淬火已用于现代化生产中，其工艺与扫描淬火所不同的是，感应器伸入滑套后，一次加热并进行喷液。加热时，为保护薄壁处不过热及减少变形，滑套外面有辅助喷液器，在加热过程中，外表面处于辅助喷液之中。

（5）钟形壳与滑套的回火　在自动线上，一般采用感应回火；专机生产的零件，一般采用炉中回火，低温回火后，达到 56 ~ 62HRC 或 ≥55HRC 等要求。内球道硬度的检测，可采用内孔硬度计。

139. 齿轮感应淬火有哪些工艺方法？

（1）逐齿淬火　早期对于大模数齿轮工作面，常用逐齿淬火，如图 5-25 所示。此工艺比较简单，但只能提高轮齿接触面的耐磨性。

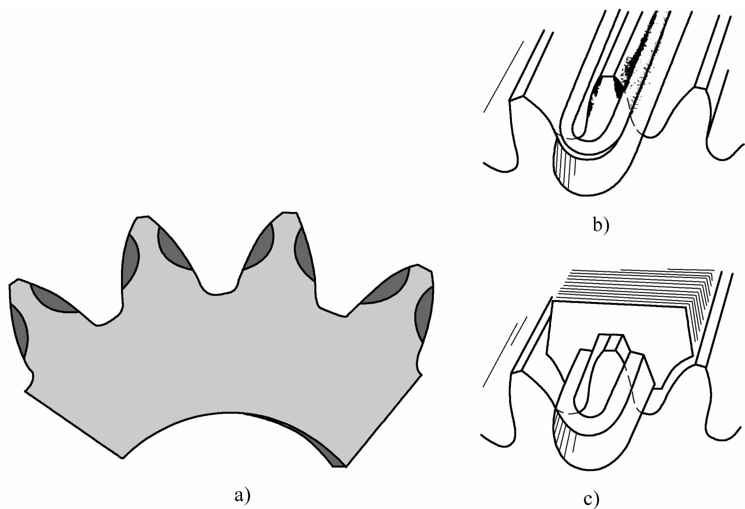


图 5-25　逐齿淬火

a）淬硬层　b）回线形感应圈　c）带导磁体的回线形感应圈

（2）齿部基本淬透　此种方法处理的齿轮齿沟部淬硬层浅。中、小模数齿轮常采用齿部基本淬透的工艺，如图 5-26 所示。该方法不适用于高速或重载齿轮。

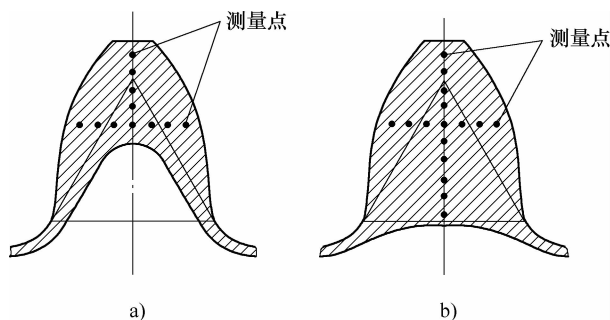


图 5-26　中、小模数齿轮齿部基本淬透
a）半齿淬透　b）全齿淬透

（3）沿齿沟淬硬　沿齿沟淬硬大都采用单齿沿齿沟扫描法得到，也有采用一次单齿加热法实现的。沿齿沟单齿淬火得到的淬硬层如图 5-27 所示。此工艺不足之处是生产率较低，要求能准确保持感应器与齿侧、齿沟的间隙。

（4）仿齿廓淬硬　仿齿廓淬硬可通过采用合适的电流频率与功率密度进行齿轮淬火，有单频法与双频法等多种方法。仿齿廓淬硬层与渗碳齿轮相似，如图 5-28 所示。现在仿齿廓淬硬已在生产中大量应用，但该方法设备一次投资费用较高。

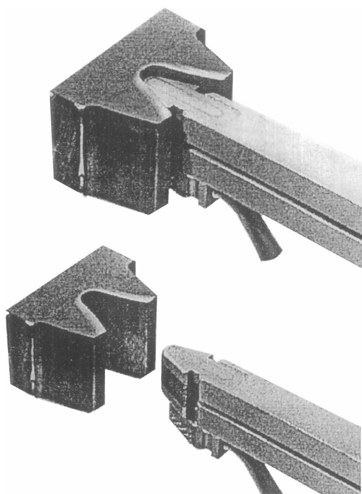


图 5-27　沿齿沟单齿淬火得到的淬硬层

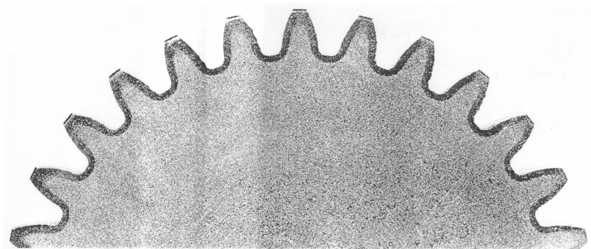


图 5-28　仿齿廓淬硬层

140. 齿轮各类感应淬火工艺方法是怎样发展的?

（1）齿轮感应淬火初期发现的两条规律

1）齿轮模数恒定时，随着感应电流频率的升高，齿顶电流密度与温度相对比齿沟会高。对某一模数齿轮，有一个使齿顶与齿沟温度相近的合适频率。

2）齿轮模数越大，相适应的电流频率越低，反之越高。其中由于齿沟部与齿轮本体的热传导作用，因此，功率密度与加热时间成为仅次于电流频率的第二决定因素。

（2）单个齿类似一个等效的圆柱体　如图 5-29 所示，当电流频率高时，轮齿相当于一个单独的圆柱体，产生涡流，邻近效应使其很快达到淬火温度；当电流频率低时，轮齿的等效直径太小，涡流只能产生在齿沟部。

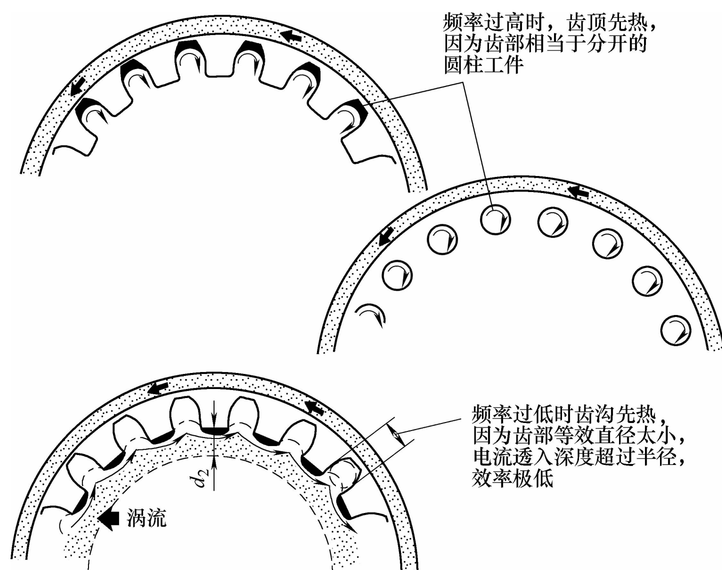


图 5-29　单个齿类似一个等效的圆柱体

（3）通过齿轮模数来确定合适的电流频率和加热时间　早期曾通过齿轮模数来确定合适的电流频率 f(Hz) 和加热时间 t(s)，经验公式如下：

$$f = 6 \times 10^5 / m^2$$

$$t = 0.05\ m^2$$

式中　m——齿轮模数（mm）。

据此，得到齿轮不同模数齿轮的最佳频率与加热时间，见表 5-8。常用标准频率适应的齿轮模数见表 5-9。

表 5-8　齿轮不同模数时的最佳频率与加热时间

齿轮模数/mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
最佳频率/kHz	600	150	66	37	24	16	12	9.3	7.4	6
加热时间/s	0.05	0.2	0.45	0.8	1.25	1.8	2.45	3.2	4.05	5.0

表 5-9　常用标准频率适应的齿轮模数

频率/kHz	硬化层深度/mm	齿轮模数/m
200 ~ 300	1 ~ 1.5	1.5 ~ 5（2 ~ 3 最佳）
30 ~ 80	1.5 ~ 2.0	3 ~ 7（3 ~ 4 最佳）
8	2 ~ 3.0	5 ~ 8（5 ~ 6 最佳）
2.8	4 ~ 6.0	8 ~ 12（9 ~ 11 最佳）

这就是现在用计算机模拟，采用双频同时加热法选择高、中频结合并分配相应功率比的基础。

（4）补偿法　由于企业生产用电源的频率与功率等级常在一定范围，很难有多种不同型号电源，因此在实际生产中，除采用表 5-9 的标准频率与适用模数外，并采用补偿法。

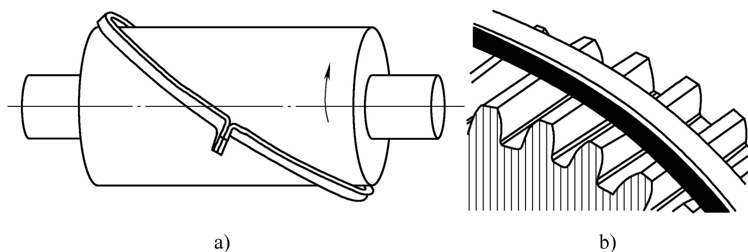
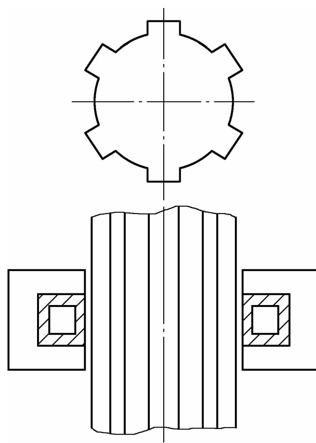


图 5-30　斜包型感应器

1）当所用电流频率比合适频率为高时，采用的方法有：①脉冲加热法，即加热—停—加热，不使齿顶温度过高，因为停电时，齿轮会进行匀温，使齿沟部温度升高；②加大有效圈与齿顶间的间隙，减少其间的邻近效应，这样，能减少齿顶与齿沟的温差，不足之处是降低了加热效率；③采用斜包型感应器，如图 5-30 所示，由于旋转时对局部只在瞬时处在有效圈内，因此，有加热—停—加热的效果，产生齿顶、齿沟间的匀温作用。

2）当采用频率低于最佳频率时，采用的方法有：①在有效圈上镶装导磁体，它能加强齿顶与有效圈间的邻近效应，能提高齿顶部的加热温度，对花键其效果也相同，如图 5-31 所示；②采用加热—停—加热的方法以达到匀温，此时是齿沟高温传到齿顶。


图 5-31　花键轴感应器上镶装导磁体

（5）采用单频法　单频法既适用于中、小尺寸齿轮，也适用于大齿轮。此法在日本某公司称为超快感应淬火。齿轮预热后，可采用高功率密度在

0.5s 内达到淬火温度，淬火后，得到超细晶粒的淬火组织。

（6）双频法　先用中频在一个感应器内预热齿轮，然后快速进入第二个感应器进行短时高频加热，使齿顶温度快速上升，达到淬火温度后立即淬火，如图 5-32 所示。此法美国通用汽车公司最早应用于链轮淬火。双频法不但适用于一次加热法，亦适用于扫描淬火法，最近几年又发展了同步双频法。

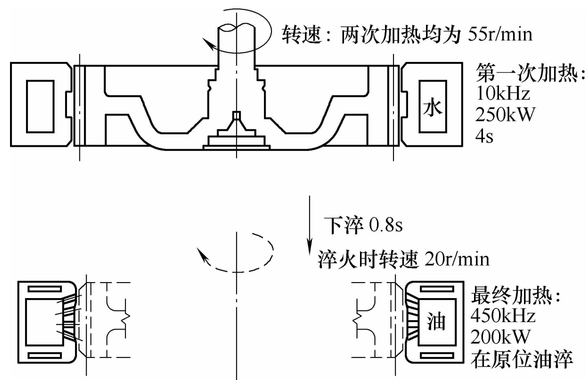


图 5-32　齿轮双频淬火

141. 同步双频齿轮淬火工艺有什么特点？

早在 1948 年，美国通用汽车公司对以中频为基波叠加上高频同时施加到一个感应器上，申请了专利，但那时没有可用的电源与合适的功率密度，因此，此法没有实际应用。直到 1993 年，德国、挪威发明的同步双频法在欧洲登记了专利。同步双频法最早的生产应用于粉末冶金制发动机正时链轮。同步双频齿轮淬火工艺的特点如下：

1）两种不同频率的电流同时输到一个感应器上。

2）通过计算机模拟选定最佳频率与功率。

3）加热时间极短，一般在 1s 以内。

142. 低淬透性钢齿轮感应淬火有什么特点？

低淬透性钢的齿轮感应淬火是前苏联功勋科学家 К. З. Шепеляковский 发明的，早在 20 世纪 60 年代应用于汽车后桥齿轮、拖拉机最终传动齿轮等。我国在 20 世纪 70 年代亦曾研制出 55Ti、60Ti、70Ti 等低淬透性钢，曾试用于拖拉机及煤机齿轮生产，但其后因钢材成分控制和供应等问题，研发及批量生产中断。现在俄罗斯的 МАЗ 及 КАМАЗ 汽车厂大量应用低淬透性钢制作重载传动齿轮。

低淬透性钢齿轮感应淬火的特点是齿轮的齿部是热透的，快冷淬火时，由于钢材的淬透性特别低，获得了沿齿廓的淬火层，而齿心部的硬度亦得到了提高。低淬透性钢是中碳钢，但对 Mn、Cr、Ni、Cu 这些合金元素含量总和控制在 0.5%（质量分数）以下，齿部虽热透，但由于极低的淬透性，在强冷条件下，只有外表的

薄层得到淬硬，齿心部的硬度则略有提高。低淬透性钢的晶粒度为 11 ~ 12 级，而一般钢的晶粒度为 7 ~ 8 级，晶粒细化使抗脆性断裂性能提高。齿轮整体加热表面淬火后，齿轮表面残留应力可达到 600MPa，增强了抗疲劳断裂的能力。

143. 齿轮沿齿沟单齿淬火工艺是怎样的?

齿轮沿齿沟单齿淬火工艺因具有轮齿力学性能好、装备电源容量小、工艺通用性好、适于多品种产品等优点而为企业所采用。

齿轮沿齿沟单齿淬火有两种方法：单齿同时加热法与单齿沟扫描淬火法。

（1）单齿同时加热法　单齿同时加热法感应器结构如图 5-33 所示。有效圈上镶装导磁体，它使齿沟得到仿齿沟淬硬层。加热结束后，感应器要退出齿沟，使淬火冷却介质喷入齿沟。

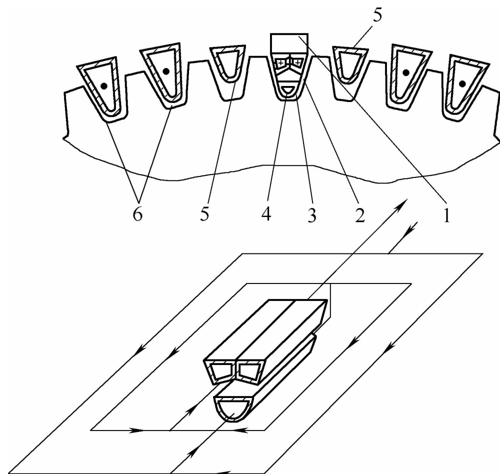


图 5-33　单齿沟同时加热法用感应器
1、3—导磁体　2、4—感应导体
5—冷却已淬火面的辅助喷液器　6—返回导体

（2）单齿沟扫描淬火法　单齿沟扫描淬火感应器如图 5-34 所示。此法适用于模数为 8 ~ 24mm 的齿轮，既能用于直齿也能用于斜齿。因此，在各机械制造领域得到广泛的应用，常采用 100kW、8000Hz 的中频电源。至于模数小于 8mm 的齿轮，一般用高频电源及高频单齿扫描感应器进行加热。图 5-35 所示为德国一研究所推荐的感应器，可进行模数为 3mm 齿轮的单齿沟扫描淬火。

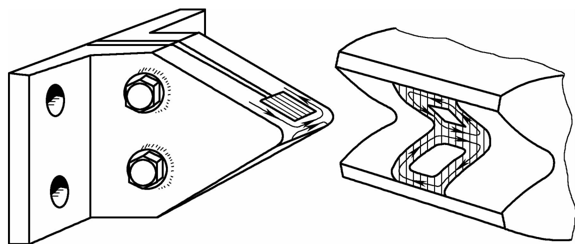


图 5-34　单齿沟扫描淬火感应器

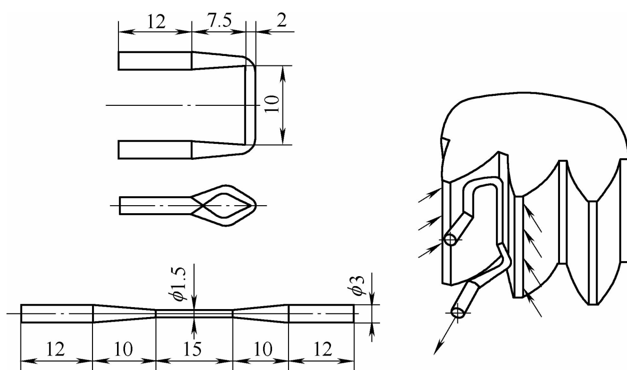


图 5-35 模数为 3mm 齿轮的单齿沟扫描淬火感应器

144. 小模数机床齿轮采用高频与超音频感应淬火，结果有什么不同?

某单位曾用小模数机床齿轮在高频与超音频电源上进行试验对比，得到如下结果:

在 250kHz 高频设备上，加热 $m=1.5\sim2.25$mm 齿轮时，齿沟与齿顶加热速度基本相同；加热 $m=2.5$mm 齿轮时，齿沟加热速度低于齿顶；加热 $m=3$mm 齿轮时，一般情况下齿沟无淬硬层。$m=2.5$mm、$m=3.0$mm、$m=3.75$mm 齿轮在 30kHz 超音频电源感应淬火后，齿沟淬硬层深（测到 50% 马氏体处）分别为 2.48mm、2.0 ~ 3.0mm、1.35 ~ 3.1mm。

超音频感应淬火与高频感应淬火相比，齿轮内孔变形，淬裂倾向、能耗略大，但齿形变化（与噪声直接有关）减小，强度增大。

145. 转向齿条高频电阻加热淬火工艺是怎样的?

汽车零件转向齿条的齿条部分需要感应淬火以增加其耐磨性，现在大多数采用高频电阻加热淬火工艺而不是感应淬火工艺。采用高频电阻加热淬火工艺优点是高频电流直接通过齿条部分，齿顶、齿沟温度基本一致，没有复杂结构的感应器，取代它的是两条具有接触头的导电板，此导电板常兼作喷液器用，如图 5-36 所示。

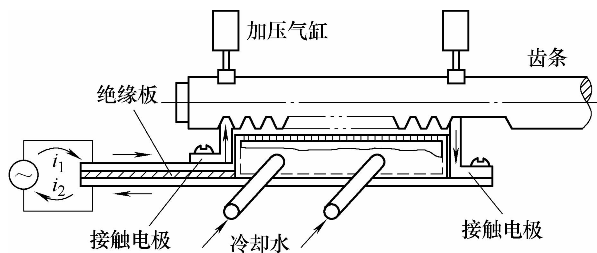


图 5-36 转向齿条高频电阻加热淬火

由于每列喷液孔必须对准齿沟，因此不同齿距的齿条必须专用的感应器，现在天津一个制造厂已将感应器与喷液器分开。

第 6 章　感应淬火件的质量检验与控制

146. 感应淬火件的质量检验一般包括哪些项目?

感应淬火件的质量检验，一般应包括外观、硬度、淬硬区域、淬硬层深度、金相组织、变形与裂纹这七个项目。

（1）外观　感应淬火件表面不得有烧熔、裂纹等缺陷。正常淬火表面是米白色夹有黑色（氧化皮）。灰白一般表示淬火温度过高，表面全部为黑色或蓝色，一般表示淬火温度不够。局部烧熔及明显裂纹、崩落、掉角在外观检查时即能发现。小批量及批量生产的零件，外观检查率为 100%。

（2）硬度　可用洛氏硬度计进行抽查，抽检率根据零件的重要程度及工艺稳定性而定，一般为 3% ~10%，再辅以锉刀检查或 100% 锉刀检查。锉刀检查时，检查员最好备有不同硬度的标准块（常为套状）进行对比，以提高锉刀检查的准确度。自动化生产中，较先进的硬度检查法已有采用涡流测试仪等检查。

（3）淬硬区域　小批量生产常采用直尺或卡尺测量，也可用强酸浸蚀淬火表面，使显现出白色淬硬区，进行检验。浸蚀法常用于调整及试验。大量生产中，如果感应器或控制淬硬区的机构可靠，一般只需抽检，抽检率为 1% ~3%。

（4）淬硬层深度　淬硬层深度目前大都还采用切割淬火件的规定检验部位，测量该部位的淬硬层深度。过去国内用金相法测量淬硬层深度，现在贯彻 GB/T 5617—2005，用测量淬硬层的断面硬度来确定其深度。淬硬层深度检查由于一般还需要破坏零件，因此，除特殊零件、特殊规定外，一般只作抽查。小零件大批量生产可为每班抽查 1 件或每生产 100、500 件抽查 1 件等，大零件可为每月抽查 1 件等。采用先进的非破坏测试仪器时，抽检率可以提高，甚至可 100% 检查。

（5）金相组织　感应淬火件的材料主要是中碳钢与铸铁，淬火件的显微组织一般是与硬度相对应的。对一些重要零件，设计图样上提出了显微组织的要求，主要是为了防止过热产生的粗大马氏体，同时防止欠热产生的未溶铁素体。

（6）变形　变形主要检查轴类零件，一般采用中心架、百分表来测量零件淬火后的摆差值。摆差值根据零件的长度、直径比而变，感应淬火零件可校直的，其挠曲量可以略大些。一般允许的摆差值与淬火后的磨量有关，磨量越小，允许的摆差值也越小。轴类一般零件的直径磨量常为 0.4 ~1mm。允许零件校直后的摆差值为 0.15 ~0.3mm。

（7）裂纹　较重要的零件淬火后均需经磁粉探伤检查，设备较好的工厂均已用荧光粉显示裂纹。经磁粉探伤的零件，应经过退磁处理后再进入下一道工序。

147. 如何测量感应淬火件的淬硬层深度?

感应淬火件的淬硬层深度按 GB/T 5617—2005 的规定，用测量零件断面硬度的方法来确定，即用维氏硬度计（9.8N 载荷）从零件表面开始测量硬度直到 0.8 倍硬度下限值（HV_{MS}）处的距离，作为有效硬化层深度（D_s），可用下式表示：

$$HV_{HL}=0.8HV_{MS}$$

式中　HV_{MS}——零件要求的硬度下限值（最小硬度值）；

HV_{HL}——极限硬度值。

用硬度法测量有效硬化层与我们过去用的金相法测量硬化层深度是有原则区别的。前者是根据零件技术要求硬度下限值而变化，后者则是按含大于 50%（面积分数）马氏体组织这一段深度作为硬化层，它基本上是固定的。

148. 钢件感应淬火后如何进行金相检验?

钢件感应淬火后应按 JB/T 9204—2008《钢件感应淬火金相检验》进行金相检验。

1）钢件经淬火、低温回火（≤200℃）后，在钢件感应淬火区的中部或技术条件规定部位截取金相试样。

2）金相试样经磨制后用含有体积分数为 2% ~5% 硝酸的酒精溶液浸蚀，直到显示出清晰的硬化层为止。

3）按照表 6-1 所示显微组织分级说明及 JB/T 9204—2008 中的显微组织分级图进行金相组织评定。图样规定硬度下限高于或等于 55HRC 时，3 ~7 级为合格；图样规定硬度下限低于 55HRC 时，3 ~9 级为合格。

表 6-1　钢件感应淬火后显微组织分级说明

级别/级	组织特征
1	粗马氏体
2	较粗马氏体
3	马氏体
4	较细马氏体
5	细马氏体
6	微细马氏体
7	微细马氏体，其碳含量不均匀
8	微细马氏体，其碳含量不均匀，并有少量极细珠光体（托氏体）+少量铁素体（<5%）
9	微细马氏体+网络状极细珠光体（托氏体）+未溶铁素体（<10%）
10	微细马氏体+网络状极细珠光体（托氏体）+大块状未溶铁素体（>10%）

149. 珠光体球墨铸铁件感应淬火后如何进行金相检验?

珠光体球墨铸铁件感应淬火后应按 JB/T 9205—2008《珠光体球墨铸铁零件感应淬火金相检验》进行金相检验。

1）珠光体球墨铸铁件经高、中频感应淬火及低温回火（≤200℃）后，在感应淬火区的中部或技术条件规定部位截取金相试样。

2）金相试样经磨制后用含有体积分数为 2% ~5% 硝酸的酒精溶液浸蚀，直到显示出清晰的硬化层为止。

3）按照表 6-2 所示显微组织分级说明及 JB/T 9205—2008 中的显微组织分级图进行金相组织评定。其中 3 ~6 级为合格；有特殊要求时，按有关技术文件规定执行。

表 6-2　珠光体球墨铸铁件感应淬火后显微组织分级说明

级别/级	组织特征
1	粗马氏体、大块状残留奥氏体、莱氏体、球状石墨
2	粗马氏体，大块状残留奥氏体、球状石墨
3	马氏体、块状残留奥氏体、球状石墨
4	马氏体、少量残留奥氏体、球状石墨
5	细马氏体、球状石墨
6	细马氏体、少量未溶铁素体、球状石墨
7	微细马氏体、少量未溶珠光体、未溶铁素体、球状石墨
8	微细马氏体、较多量未溶珠光体、未溶铁素体、球状石墨

150. 机床灰铸铁导轨感应淬火后如何进行金相检验？

机床灰铸铁导轨感应淬火后按照表 6-3 所示显微组织分级说明及相关显微组织分级图进行金相组织评定。其中 3 ~6 级为合格，局部允许出现 7 级。

表 6-3　机床灰铸铁导轨感应淬火后显微组织分级说明

级别/级	组织特征
1	珠光体 + 珠光体形态马氏体
2	马氏体 + 托氏体
3	隐晶马氏体 + 珠光体形态马氏体 + 小于 2% 的珠光体
4	隐晶马氏体 + 细针马氏体
5	细针马氏体 + 隐晶马氏体
6	细针马氏体 + 小于 10% 的残留奥氏体
7	针状马氏体 + 大于 10% 的残留奥氏体
8	粗大马氏体 + 大量残留奥氏体

151. 钢铁件的感应淬火质量控制对设备有什么要求？

根据 JB/T 9201—2007《钢铁件的感应淬火回火》，对感应加热电源的要求如下：

1）感应加热电源的控制精度见表 6-4。

表 6-4 感应加热电源的控制精度

电源种类	电压	功率
变频机式、电子管式及其他	±2.5%	±5%
晶闸管、晶体管式	±2%	±4%

2）配备控制加热时间的限时系统，其综合精度见表 6-5。

表 6-5 限时系统的综合精度 （单位：s）

时间范围	综合精度
≤1	≤0.1
1~60	≤0.15

3）淬火机床使用固定淬火机械、移动淬火机械或其他与待处理件的形状相适应的淬火设备时，必须能保持或调整至表 6-6 规定的精度。

表 6-6 感应淬火机床的精度

检验项目	精度
主轴锥孔径向圆跳动	≤0.3mm
回转工作台面的圆跳动	≤0.3mm
顶尖连线对滑板移动的平行度	≤0.3mm（夹持长度≤2000mm）
工件进给速度变化范围	±5%

152. 钢铁件的感应淬火回火过程质量控制有哪些内容？

（1）感应器的设计与选用　感应器、喷水器的结构、形状及尺寸精度应满足使用要求。

（2）感应器的检查　对冷却器和相关夹具进行检查，对感应器的变形、破损以及线圈的状态等应当加以确认；还要对冷却器出水口进行检查与清理，并确认夹具能正常动作。感应器与变压器端板之间必须保持良好接触。

（3）工件的装夹　装夹时需严格保持工件与感应器的相对位置正确，特别是应当注意偏心和倾斜，以保证加热与冷却速度相对均匀。避免因为工件的局部加热引起的膨胀、畸变导致感应器与工件间的接触放电等故障。

（4）工件的淬火加热与冷却　根据工件、设备条件和试验结果，确定加热工艺参数，如功率或回路电压、加热温度、加热时间或工件进给速度等。

选用适当的冷却介质，试验确定冷却工艺参数，如介质温度、压力、流量、浓度的范围及冷却时间。必要时为控制工件畸变也可采用加压淬火。

（5）工件的回火加热与冷却　回火加热与冷却时，确认加热与冷却的条件，为避免发生开裂、畸变和其他缺陷应当在淬火后及时回火，也可采用自回火的方法。回火温度的选择应使工件及表面获得规定的性能。

（6）感应淬火及回火之后的校直处理　热处理后对需校直的工件应当确保校

直产生的残余应力不妨碍后续的机械加工与使用，必要时应进行去应力处理。

（7）记录　应按规定和工艺要求对处理工艺进行记录，并妥善保管，以便备用。

153. 感应淬火件淬硬层深度波动的影响因素有哪些？

（1）材料因素　感应淬火钢中，锰、铬、钼含量对淬硬层深度波动影响最大。如果切割感应淬火件发现加热层深度相似，但淬硬层深度变化很大，应怀疑材料因素。

（2）设备因素

1）电源电压波动而又没有能量监控会造成淬火温度波动，它直接影响淬火件的质量。

2）淬火机扫描速度波动，液压淬火机因油温变化影响扫描速度，此问题在现代淬火机床上由于采用机械传动方式已经不再产生了。

3）感应器老化和变形，特别是导磁体老化。导磁体老化，感应器效率降低了，直接降低淬火温度，这是个值得注意的问题。

（3）淬火介质因素　淬火介质的浓度、压力、流量、温度均会影响淬硬层深度。

154. 如何解决感应淬火件的变形问题？

感应淬火件的变形有多种形式，如轴、条板的弯曲，孔的胀大、缩小或出现锥度，盘状件的挠曲，滚珠丝杠螺距的伸缩，单齿淬火节距累积误差等。

（1）细长轴件的弯曲畸变　扫描淬火细长轴件时发生畸变，解决的方法如下：

1）放松上顶尖，用弹簧顶尖、气动顶尖或一端可自由伸长，消除工件加热伸长时产生的阻力。

2）增加校正辊，当感应器通过时能自动让开，其作用与车床中心架相似。

3）要使有效圈、喷液器尽可能与工件同心则加热温度与冷却速度在圆周上是均匀的，产生的弯曲也会减少。

（2）条板状工件的弯曲畸变　单面淬火时常发生凹陷形畸变，解决的方法如下：

1）对称淬火。如果工件技术要求允许，将两个面同时扫描淬火，会减少畸变，还有是在淬火面的对面用火焰加热，可减少畸变。

2）预弯。将待淬火件先进行凸肚形预弯，淬火后产生凹陷形正好抵消畸变，此方法在钢轨表面淬火中已应用。

（3）内孔畸变　缸套内表面淬火后一般内孔径收缩，原因是缸套外壁有水冷却，内表面淬火后，组织体积增大不能向外扩只能向内挤，所以孔径缩小，此畸变是有规律的，可以修改随后珩磨工序的预留磨量，即淬火前孔径略加大，抵消淬火产生的收缩量。内齿圈全齿淬火时可采用同样的方法处理。

（4）加热过程中的变形　薄片件如木工锯片 ϕ500mm×3mm，齿部高频感应淬火。这个工件在加热过程中即会呈波浪形扭曲，极不规则，这是因局部温度不匀由热应力而产生，以后采用将工件在普通炉中预热到650℃再高频感应加热，温升从800℃改变为150℃，锯片上热应力减小，不再扭曲变形，使齿部高频感应淬火顺利完成。

（5）齿轮变形　减少齿轮淬火变形的措施大致如下：

1）防止齿轮内孔缩小。许多机床厂总结了这方面的经验，有些机床厂要求齿轮淬火后，内孔收缩 <0.005mm，或 <0.01mm，而一般高频感应淬火后，内孔收缩常达0.01～0.05mm；有些厂将花键内孔先预热，然后再淬外齿；有些厂对厚壁齿轮在齿坯粗车后，增加高温回火工序，再加高频感应正火以产生应力，然后精车、拉花键、切齿、剃齿、高频感应淬火、低温回火，可控制内孔收缩在0.005mm 以内。

2）对逐齿淬火的齿轮，最后淬火的轮齿变形最大。因此，逐齿淬火减少变形的方法是交替地进行淬火，即隔开一或两个齿进行淬火。图 6-1 示出逐齿淬火时最后淬火轮齿的变形。

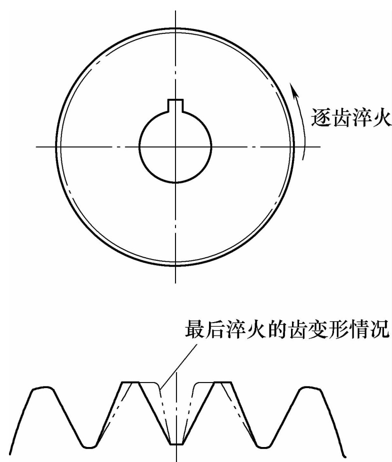


图 6-1　逐齿淬火时最后淬火轮齿的变形

155. 感应淬火件硬度达不到技术要求的原因有哪些?

感应淬火件硬度达不到技术要求的原因是多方面的。

（1）淬火温度不够　即加热不足，未达到奥氏体化温度要求。对中碳结构钢来讲，奥氏体中有未溶铁素体，淬火组织中除马氏体外存在未溶铁素体，工件的淬火表面常呈蓝色。从感应淬火件外观上也可看出，正常淬火表面呈米色，过热表面呈白色。

（2）冷却不足　即冷却速度低于临界冷却速度。淬火组织中除部分马氏体外，还存在托氏体，托氏体量越大则硬度越低。常发生在淬火冷却介质浓度、温度、压力变动与喷液孔堵塞等情况时。

（3）自回火温度过高　在轴类扫描淬火中会发生自回火温度过高的问题，一般是卧式轴类淬火或台阶状轴类垂直淬火时发生的。当喷液器宽度较短时，加热表面快速通过喷液器没有将淬火段冷够，而水流因台阶（大直径段在上，小直径段在下）阻挡，不能继续冷却已淬火段时产生。因此，淬火表面常可观察并检测到明显的自回火温度过高。

（4）软点或螺旋状黑带　淬火表面的软点常呈黑色，典型的螺旋状黑带是扫

描淬火件常见的缺陷现象。此黑色带亦即软带，常是托氏体组织。解决的方法是喷液要均匀，提高工件转速也能缩减黑带的螺距，但最基本的是喷液器的结构要使加热面冷却均匀。喷液孔堵塞常是软点产生原因之一。

（5）材料化学成分的影响　材料成分特别是碳含量减少，是硬度降低因素之一，必要时对重要件可采用精选碳含量，使 w（C）上下限缩小到 0.05% 以内。

（6）预备热处理情况　调质工序变动，轧材黑皮留在淬火面等也是感应淬火件硬度达不到技术要求的原因。

（7）表面脱碳、贫碳　常发生在冷拔料表面，因此对这些棒材淬火后检测硬度可以先磨去外层 0.5mm 再检测硬度。如果表面硬度低，内层硬度高于表面，说明有贫碳或脱碳层存在（特殊几何形状如凸轮桃尖、齿轮顶部例外）。

（8）带状原始组织　淬火部分原始组织中有带状组织会导致淬火后硬度不足。带状组织中有未溶铁素体存在，奥氏体化过程中未能溶解，淬火后硬度必然不够，带状组织即使提高加热温度也难消除。

156. 哪些工艺不当会造成感应淬火件产生裂纹？解决措施是什么？

造成感应淬火件产生裂纹的不当工艺及解决措施见表 6-7。

表 6-7　造成感应淬火件产生裂纹的不当工艺及解决措施

现象	原因	解决措施
加热温度不匀或过热	1）感应器设计和制造不良，导致局部温度不匀或过热 2）加热装置电规范失控，功率过大或加热时间过长 3）工件与感应器相对位置不正确，操作顺序错误	1）改进设计与制造质量 2）纠正控制系统存在的弊病 3）针对问题严格操作工艺规程
冷却不良，冷却不均匀	1）淬火冷却介质选择不当 2）喷液器结构设计不良 3）淬火冷却介质规程制订或管理不当（浓度、流量、时间、喷液器维护不当）	1）选择合适的淬火冷却介质，控制临界冷却速度与马氏体段冷却速度 2）改进设计 3）改进冷却规程的制订与执行
回火不良	1）淬火后未及时回火 2）回火加热速度与温度不恰当 3）返修时未进行正火或高温回火	1）执行及时回火 2）采用正确的回火温度 3）返修件需正火或高温回火

157. 哪些材料因素会使感应淬火件产生裂纹？解决措施是什么？

感应淬火用钢，材料的淬裂敏感性是一个极重要的因素。一般 w（C）应为 0.35% ~0.5%，如果 w（C）>0.5% 就容易淬裂；w（Mn）≥1.5% 时，易淬裂。Ni 对淬裂不敏感。Cr 由于形成的碳化物在加热时不易溶入奥氏体中，对淬裂也敏

感，w（Cr）应为 0.5% ~1.5%。Mo 与 Cr 一样易形成碳化物，w（Mo）一般为 0.15% ~0.5%。P、S 在快速加热时，质量分数应≤0.035%为宜。

对重要零件，一些企业已成功地应用精选碳含量，定点用钢，缩小碳含量上下限的范围，对稳定工艺、硬化层深度，减少淬火裂纹均有效果。

此外，钢材中存在的气孔、非金属夹杂物，特别是晶界上析出的硫化物，对淬裂均有影响。钢材经过预备热处理、正火或调质，原始组织均匀了，可减少淬火裂纹，因为不均匀的原始组织，存在碳化物偏析，淬火后偏析处硬度高，易产生裂纹。

158. 造成感应淬火件产生裂纹的不合理结构设计有哪些？

1）产品设计上，同一淬火区段上壁厚不匀，导致加热不匀，过渡段最易淬裂。

2）阶梯轴的台肩越宽，台肩处越易产生裂纹；台肩处 R 越小，应力易集中，温度不易均匀，不易淬硬。

3）硬化区内存在孔，孔径越大，涡流在流经孔边缘处易集中；该处温度过高，易淬裂。典型的例子是图 6-2 所示的曲轴颈上斜油孔锐角侧的淬火裂纹。

4）键槽两端与轴端未倒角，零件上有尖角，电流集中过热，易淬裂。

5）机加工刀痕太深，即表面粗糙度值太大时，易产生裂纹。

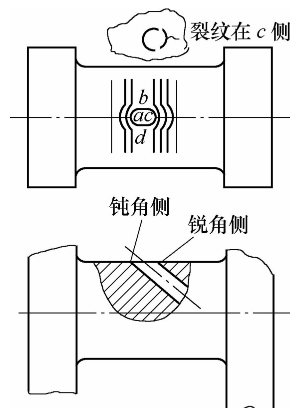


图 6-2　曲轴颈上斜油孔锐角侧的淬火裂纹

159. 如何解决感应淬火件出现磨削裂纹的问题？

常有许多感应淬火件，淬火后磁粉探伤未发现裂纹，而在磨削后却出现了裂纹，而且裂纹与砂轮运动方向相垂直。一般判定为磨削裂纹，查找磨削进刀量是否太大，砂轮粒度、硬度、磨钝未及时修磨等因素。一般在机加工磨削规范上采取措施后，能够得到解决。

从感应淬火方面查因素，则硬化区表面存在高的拉应力时最易产生磨裂；未及时回火，或回火温度、时间不合适，亦常常是因素之一。曲轴颈硬化区两侧是拉应力区，感应淬火后，曾出现过沿圆周方向的淬火裂纹（不带圆角淬火的曲轴颈）。

160. 如何解决感应淬火件的局部烧熔问题？

感应淬火件的表面烧熔常是造成工件报废的一种重大缺陷，因此必须进行预防，避免其产生。

（1）感应器有效圈与工件间隙太小　如果感应器有效圈与工件间隙太小，加热过程中会产生短路、表面烧熔，预防措施如下：

1）有效圈上涂复绝缘耐温材料，以前曾使用过涂覆搪瓷层，现在则改进为喷涂氧化铝（Al_2O_3）或包覆其他耐高温材料，如玻璃纤维套管、高硅氧织带等，

2）使加热工件与有效圈绝缘，如工件定位在装有绝缘套管的顶尖上等，则工件即使与有效圈相碰，也不产生烧熔。

3）增强有效圈的刚性，就不会因电磁力的作用产生振动而改变间隙等。

4）安装间隔定位块，如曲轴感应器上设计有间隔定位块，保证有效圈与工件不会接触，定位块最好用耐温、抗冲击、耐急冷的材料制作。

5）安装接地故障断流器。现代感应淬火机床上已装有接地故障断流器安全装置，当工件与有效圈相碰时，能在 16ms 内自动断开。

（2）铸件缺陷　铸件缺陷（如缩孔、疏松、夹杂物等）常使感应电流局部集中，造成工件烧熔。感应加热时，采用低的功率密度，可减少烧熔。

（3）改进工件设计　尽量避免边棱、尖角、倒角、小孔位置及厚薄不匀等，从而避免局部涡流集中。

（4）改进有效圈设计　如局部放大间隙，局部装背向导磁体、屏蔽板等。

161. 什么是硬化层剥落？如何解决？

在硬化层表面到原始组织整个深度的边界剥落，或在较小深度处剥落称为硬化层剥落。这种缺陷产生原因是零件中有较大的内应力存在。解决的措施是零件淬火后，应及时回火，或采用自回火；在产品设计方面，应选择合适的硬化层深度。

162. 什么是硬化层崩落？

零件表面上出现网状裂纹，然后一片片的金属薄片沿裂纹处崩落，像表面脱皮那样，这种现象称为硬化层崩落。硬化层崩落大都发生在磨削后，特别在大进刀时容易发生。这常常是磨削的缺陷，但淬火过热时，亦可能发生。

163. 什么是硬化层边棱开裂、掉圈？如何解决？

简单形状的圆柱零件如果在端头未倒角，带有尖锐的边棱，则在不正确的扫描淬火过程中，边棱就过热了，特别在淬火终了，感应器将离开零件时，在边棱上形成很大的内应力，因此产生开裂，有时呈环状整圈掉下来。这就是硬化层边棱开裂、掉圈现象。解决的措施除淬火时不使边棱过热外，从产品设计上，端头必须有倒角。

164. 我国与感应热处理相关的现行标准有哪些？

我国与感应热处理相关的现行标准见表 6-8。

表 6-8　我国与感应热处理相关的现行标准

序号	标准号	标准名称
1	GB/T 5617—2005	钢的感应淬火或火焰淬火后有效硬化层深度的测定
2	JB/T 9201—2007	钢铁件的感应淬火回火处理
3	JB/T 9204—2008	钢件感应淬火金相组织

（续）

序号	标准号	标准名称
4	JB/T 9205—2008	珠光体球墨铸铁零件感应淬火金相检验
5	JB/T 9211—2008	中碳钢与中碳合金钢结构钢马氏体等级
6	JB/T 8555—2008	热处理技术要求在零件图样上的表示方法
7	JB/T 8491.3—2008	机床零件热处理技术条件　第 3 部分：感应淬火、回火
8	GB 8702—1988	电磁辐射防护规定
9	GB/T 10067—2008	电热装置的基本技术条件
10	GB/T 3924—1999	中频感应加热装置用变压器
11	JB/GQ 1093—1987	金属切削机床灰铸铁导轨感应加热淬火金相评级
12	JB/T 8669—1997	中频感应加热用半导体变频装置
13	JB/T 6955—2008	热处理常用淬火介质技术要求
14	JB/T 4392—2011	聚合物水溶性淬火介质测定方法

第 7 章　感应器的设计与制造

165. 感应器的设计与制造应达到哪些要求?

1）达到工件加热范围的要求，加热区温度应均匀一致，冷却均匀（如感应器带附加喷液器或具有喷液孔时，必须考虑）。

2）具有一定的强度与耐用度，不同类型的感应器具有不同的耐用度（次数）。

3）要便于装卸（特别是通用淬火感应器）。

4）要便于制造、合理用材，做到标准化、通用化与系列化。

5）与电源相匹配，节能、高效。

166. 感应器设计时，如何应用相关理论与法则?

（1）趋肤效应　感应器上通过的高、中频电流是走表面的，对于纯铜在通水冷却的情况下，电流在铜中的透入深度 $\Delta_{铜}$ （mm）为

$$\Delta_{铜}=67/\sqrt{f}$$

式中　f——电流频率（Hz）。

（2）邻近效应　在感应器的导电板（管）之间具有电流方向相反的两导体的邻近效应。在多匝感应器的匝与匝之间具有电流方向相同的两导体的邻近效应。所有感应器有效圈与加热工件之间均存在邻近效应。在感应器设计中，如能巧妙地利用邻近效应，则能大大提高感应器的效率。

（3）电流走捷径的特性　电流走捷径的趋向是因为走捷径时电阻小。因此，在感应器铜板厚的部位时要考虑此因素。

（4）合理涡流途径的选择　当齿轮同时加热整圈齿时，要求齿顶、齿槽均能加热，应选择圆环形感应器；蜗杆、丝杠、带台肩的轴加热时，应选择走轴向电流的回线形感应器，使键顶、底、轴台肩处均有涡流通过，从而使各点加热温度一致。蜗杆感应器的电流走向如图 7-1 所示。

（5）局部涡流集中现象　感应加热时，对零件的尖角、小孔、小圆弧处有时会产生涡流集中现象，当电流频率增高时，此现象更为显著。

（6）导磁体在有效圈上的驱流作用　感应器有效圈上装“Π”形导磁体，高频电流通过导体时，由于

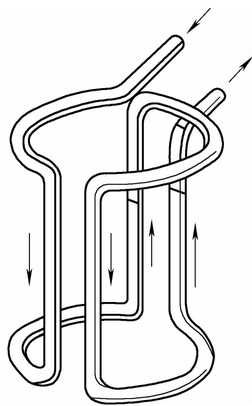


图 7-1　蜗杆感应器的电流走向

心部磁通密度大，自感电势也大，电流被驱向感抗小的开口侧。

167. 感应器设计时，基本结构尺寸应如何确定？

（1）板（管）厚的选择　板（管）厚应大于 $1.57d_{\text{铜}}$，此时导体的电阻最小。不同电流频率时的 $1.57d_{\text{铜}}$ 值见表 7-1。

表 7-1　不同电流频率时，铜导体的选用

频率/kHz	$1.57d_{\text{铜}}$/mm	导体厚度/mm
1	3.5	3.0～4.0
2.5	2.2	2.0
8	1.2	1.5
10	1.1	1.5
250	0.22	1.0
400	0.17	1.0

（2）接触板（管）的设计　应保证本零件能与淬火变压器（或感应器夹头）连接可靠、紧贴、坚固，并有一定的接触应力；贴合面应平直，表面粗糙度值不高于 $Ra1.6\mu m$，接触面如为凹形凸台更好。

高频感应器压紧螺栓不小于 M8，中频感应器压紧螺栓不少于 2 个 M12。接触板厚度应大于 $1.57d_{\text{铜}}$，但小于 12mm。板宽根据感应器承受功率大小而变，在 60～190mm 范围内选取，功率大时选上限。

（3）导电板（管）的设计　感应器上的功率是沿导体长度分配的，为使有效部分分得较多的功率，导电部分宜短不宜长。由于电阻与导电截面积大小成反比，因此，导电板宜宽不宜窄。

（4）有效圈的设计

1）有效圈高度

①　工件外圆淬火时，同时加热感应器有效圈高度与工件高度差见表 7-2。

表 7-2　外圆同时加热时有效圈高度与工件高度差

频率/kHz	h/mm		
	示意图	间隙 <2.5	间隙 >2.5
2.5～10	h	0～3	0～3
20～400	h	1～3	0～2

② 工件内孔淬火时，同时加热感应器有效圈高度与工件高度差见表 7-3。

表 7-3　内孔同时加热时有效圈高度与工件高度差

频率/kHz	示意图	h/mm
20～400		3～7
2.5～10		2～5

③ 为避免淬硬层在工件截面上呈月牙形，有效圈两端可设计成凸台式，凸起高度为 0.5～1.5mm，宽度为 3～8mm，如图 7-2 所示。

④ 当感应器为半环形时，可以用增长径向导管长度的方法来提高轴颈两端的温度。

⑤ 当长轴的中间一段淬火加热时，要考虑轴两端的吸热因素。一般有效圈宽度应比加热区宽度大 10%～20%，功率密度小时取上限。

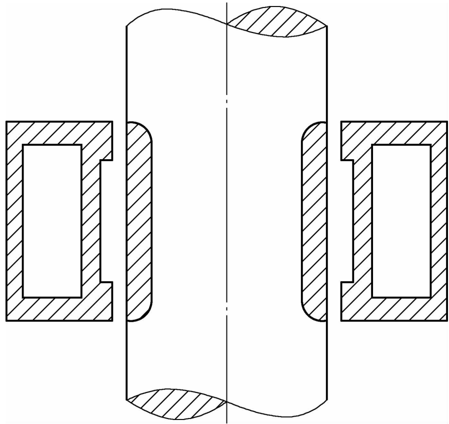


图 7-2　有效圈两端加凸台使淬硬层月牙形变成均匀深度

2）有效圈壁厚：当通水冷却时，按表 7-1 选择；当不通水冷却时，壁厚为 8～12mm。

① 外圆淬火时，有效圈与工件的间隙见表 7-4。当轴类外圆连续加热淬火时，有效圈与工件的间隙应考虑工件加热时的弯曲。

表 7-4　外圆淬火时有效圈与工件的间隙

频率/kHz	工件直径/mm	同时加热时的间隙 e/mm	连续加热时的间隙 e/mm
2.5～10	30～100	2.5～5.0	3.0～5.5
	100～200	3.0～6.0	3.5～6.5
	200～400	3.5～8.0	4.0～9.0
	>400	4.0～10.0	4.0～12.0

（续）

频率/kHz	工件直径/mm	同时加热时的间隙 e/mm	连续加热时的间隙 e/mm
20 ~ 400	10 ~ 30	1.5 ~ 4.0	2.5 ~ 4.0
	30 ~ 60	2.0 ~ 5.0	2.5 ~ 4.5
	60 ~ 100	2.5 ~ 5.5	3.0 ~ 5.0
	> 100	2.5 ~ 5.5	3.5 ~ 5.5
示意图		e	e

② 内孔淬火时，有效圈与工件的间隙见表 7-5。

表 7-5　内孔加热时有效圈与工件的间隙

频率/kHz	同时加热时的间隙 e/mm	连续加热时的间隙 e/mm
2.5 ~ 10	2.0 ~ 5.0	2.0 ~ 2.5
20 ~ 400	1.5 ~ 3.5	1.5 ~ 2.5
示意图	e	e

③ 平面淬火时，有效圈与工件间隙见表 7-6。

表 7-6　平面连续加热时有效圈与工件的间隙 e

频率/kHz	间隙 e/mm	示意图
20 ~ 400	1.5 ~ 2.0	A—A e A A 导磁体
2.5 ~ 10	2.0 ~ 3.5	

168. 感应器设计的基本原理有哪些?

感应器与变压器相似，感应线圈是变压器的一次绕组，而被加热工件是变压器的二次绕组。图 7-3 所示为用电路图说明感应加热与变压器的类似性。

变压器的主要特点之一是一二次绕组间的耦合效率与它们之间的距离的平方成反比；一次绕组上的电流乘以一次绕组匝数等于二次绕组的电流乘以二次绕组的匝数。

1）为得到最大的能量传递，线圈与工件的耦合距离应尽可能小（间隙要小）。这样，磁力线穿过工件越多，磁通越密，工件中涡流越大，加热越快。

2）螺管线圈中磁力线最密集的部分是线圈内部，因此，线圈内部加热速度最大。

3）由于磁力线集中靠近线圈，离它远就减弱，所以线圈的几何中心是一个弱的磁场。此时，工件靠近线圈的部分将与很多磁力线相交，加热速度就快，而间隙大、耦合小的部分加热速度就慢，见图 7-4。此种效应在高频感应加热时更为明显。

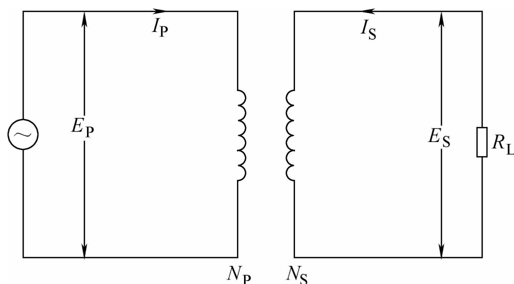


图 7-3　用电路图说明感应加热与变压器的类似性

E_p——一次电压　I_p——一次电流　N_p——一次匝数

E_s—二次电压　I_s—二次电流

N_s—二次匝数　R_L—负载电阻

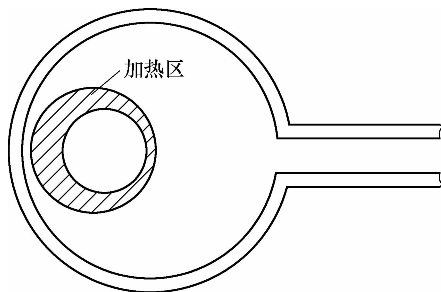


图 7-4　偏离线圈中心的圆棒加热示意图

4）在导电板（管）与线圈的连接处，磁场较弱。因此，感应器的磁力中心（沿轴向）不一定是几何中心，此效果在单匝线圈时，更为明显。随着线圈匝数的增加，每一匝的磁通量都被加到前面的匝上去，此磁场较弱的情况就不重要了。由于这种现象，加之操作中不可能总把工件放在线圈的中心，因此，工件应放在偏离磁场较弱的区域。此外，工件应该旋转，使加热均匀。

5）设计感应线圈时，要防止由于线圈两边电流方向相反而导致感应磁场互相抵消。在图 7-5a 中，由于线圈的相反，两边靠得太近，而无电感产生。图 7-5b 所示是将感应器做成环线形（线圈在中间）就会产生电感，此时中间插入导体就会加热。图

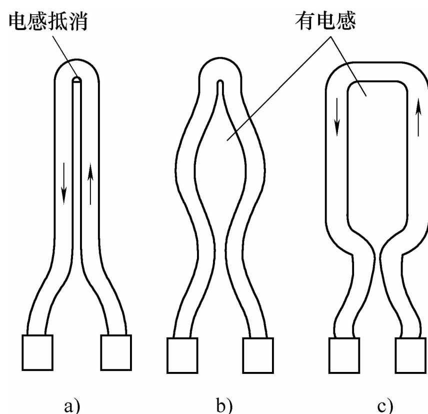


图 7-5　线圈设计的电感效应

a）电感抵消　b）有电感　c）良好设计

7-5c 的设计结构可产生很多电感，是具有代表性的一种好的设计。

169. 感应器的耦合效率哪种形式较高？

常见的感应器有外圆式（多匝或单匝）、盘香式（薄饼式）、发夹式、通道式与内孔式，如图 7-6 所示。耦合效率是指线圈提供给工件能量的分数，它不是整个系统的效率。外圆多匝式感应器因为工件处于磁通量最大的线圈内部，因此耦合效率最高；盘香型感应器只有一面的磁通与加热面相交，因此效率较低；内孔加热感应器则是利用外磁场加热工件，效率更低。不同类型感应器的耦合效率见表 7-7。

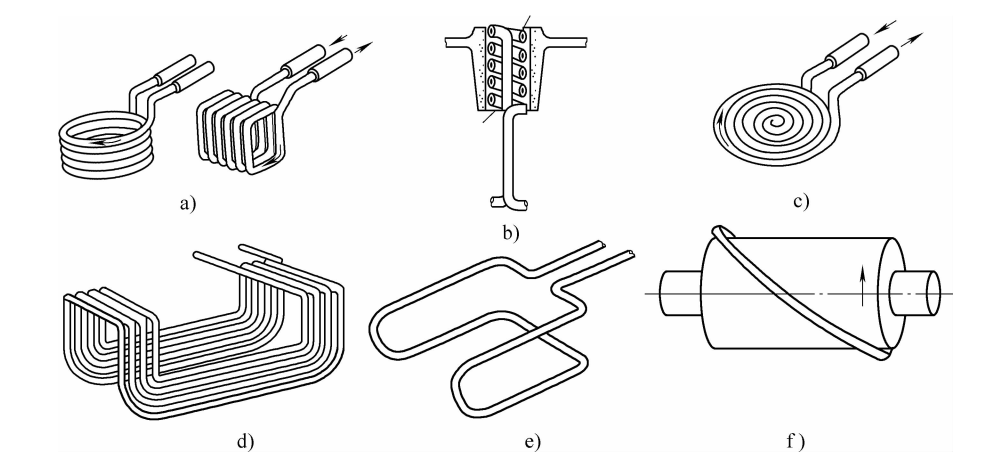


图 7-6　常见的高频感应器

a）外圆感应器　b）内孔感应器　c）盘香式感应器　d）通道式感应器
e）发夹式感应器　f）斜包式外圆单匝感应器

表 7-7　感应线圈的耦合效率

类型	频率 10kHz 时		频率 450kHz 时	
	磁性钢材	其他金属	磁性钢材	其他金属
多匝外圆	0.75	0.50	0.80	0.60
盘香式	0.35	0.25	0.50	0.30
发夹式	0.45	0.30	0.60	0.40
单匝外圆	0.60	0.40	0.70	0.50
通道式	0.65	0.45	0.70	0.50
内孔	0.40	0.20	0.50	0.25

从表 7-7 可看出，多匝外圆式线圈具有最高的耦合效率，而平面及内孔线圈的耦合效率最低。

170. 高频感应器设计典型结构有哪些？

（1）凹口内侧面加热感应器（见图 7-7）　该感应器利用邻近效应，用以加热

内侧面。感应器的有效部分是中间两根导电管。由于两管电流方向在任何时候均相同，因此导电管上的电流被排挤向外侧。此两根导电管上虽未加导磁体，但却有相当高的加热效率。此感应器的缺点是外边两根导电管引起无谓的损耗，并使零件外侧加热。

（2）蜗杆加热感应器（见图7-8）　此感应器有以下特点：

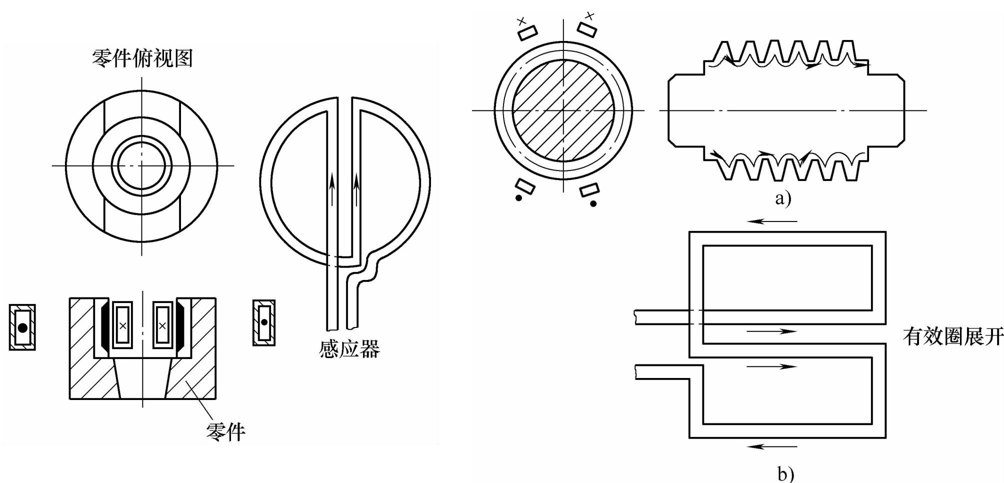


图7-7　凹口内侧面加热感应器

图7-8　蜗杆加热感应器
a）蜗杆与涡流走向　b）有效圈展开图

1）有效圈电流方向与蜗杆轴线方向平行，因此涡流既流过齿顶又流过齿根，蜗杆齿顶与齿根温度比较接近。

2）此感应器充分利用了邻近效应这一法则，相邻导电管电流同向，相面对的两排导电管电流方向相反。因此，导电管上的电流流向内侧面，使感应器效率提高。当蜗杆齿高较高时，要加大间隙，与前述加热花键的道理相同。

（3）轴肩端面加热感应器（见图7-9）　图7-9所示零件只要求端面淬火，采用圆环形感应器。由于环状效应，高频电流将流向有效圈内侧，这样将导致轴颈外圆加热，这是不希望发生的。为此，应将轴颈外圆一边的间隙加大到5mm，而将端面一边的间隙缩小到0.5～1mm；或加导磁体。这样，环状效应驱使电流流向有效圈内侧的作用将弱于端面邻近效应，迫使高频电流流向有效圈底面。因此，零件端面首先达到淬火温度而轴颈外圆将淬不上火。

（4）轴颈法兰面不需加热的感应器（见图7-10）　由于A面倾斜，A面与法兰面的邻近效应减弱，可使法兰面加热作用大大减小。高频感应器用于曲轴颈淬火时，为使曲柄面不受热，必须应用这样的设计。

（5）套管端面加热感应器　有以下两种设计：

1）锥环形感应器见图 7-11。由于环状效应，当 $a_1 > a_2$ 时，则端面内、外侧温度能均匀一致。

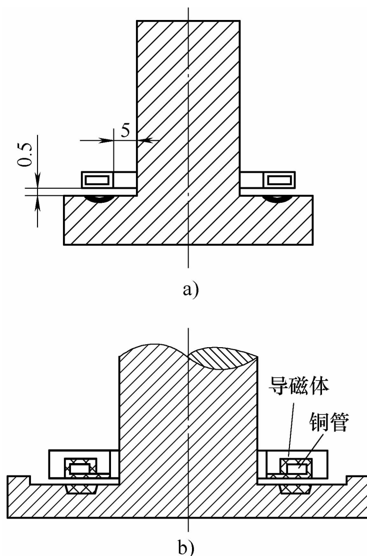


图 7-9　轴肩端面加热感应器

a）改变间隙　b）加导磁体

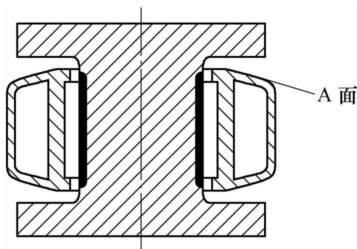


图 7-10　轴颈法兰面不需加热的感应器

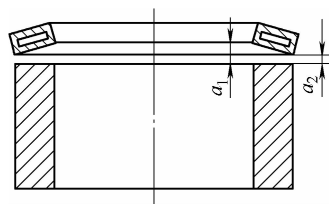


图 7-11　锥环形感应器

2）菊花形感应器见图 7-12。感应器邻近效应使电流流过底面。4 个小圆环产生磁场，加热零件端面，由于小圆环的导电管既穿过套管端面的外圆，又穿过套管端面的内圆，又由于零件是旋转的，因此套管端面内、外温度均匀。设计有效圈时，越扁越好。如果在有效圈上装上导磁体，其效果更好。

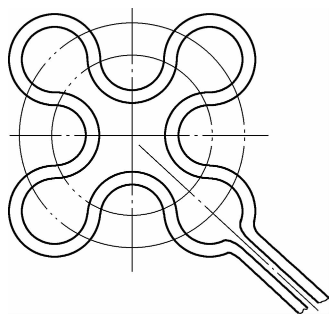


图 7-12　菊花形感应器

（6）三线式感应器（见图 7-13）　该感应器适合加热小零件的圆弧头部，如圆柱螺钉头、气门端头等，并可一次加热许多零件。有效圈截面形状可根据需要设计成矩形或圆形，以适合不同的淬硬区宽度要求。

（7）蝴蝶形感应器（见图 7-14）　该感应器能解决圆柱端头平面的加热，但工件必须旋转，如果圆柱端头直径小或因感应器阻抗太大而不匹配时，可以减少一半匝数，即中间同向导管由 4 根减为 2 根，两侧翅膀均减为一根导管，其翅膀可以与中间导管在一个平面或上抬，根据不同工件而变化。

171. 中频感应器设计时，基本结构、尺寸如何确定？

中频感应器一般由接座、导电板、有效圈、水冷喷水装置与附加装置五部分组成。

（1）接座的设计　接座是将感应器连接到变压器二次圈的接触板，一般由厚铜板制成。它与变压器二次绕组贴合的表面，要求精加工，使能紧贴变压器，并且牢固地与变压器二次绕组相连。紧贴可以减少接触电阻，否则会导致接座发热或烧伤。设计接座时，并应考虑安装方便。半自动曲轴淬火机半环形感应器的接座为两个圆锥面，由于有快换机构，装卸一个感应器的时间不超过 15s。

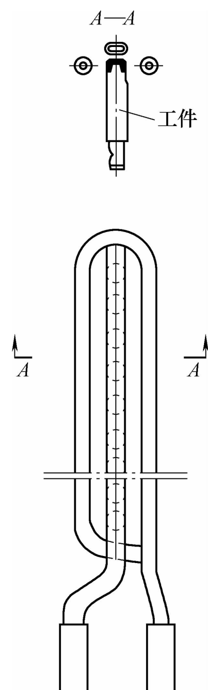


图 7-13　三线式感应器

（2）导电板的设计　导电板是接座与有效圈间的连接板。导电板常作成梯形，导电板间的间距越小，则电感越小，常用 2mm。导电板越短，则导电板上损耗越小；过短则影响夹具安装。因此，常用 100 ~ 250mm，个别情况下用到 1500mm。导电板厚度除应大于 $1.57d_{铜}$（$d_{铜}$ 为电流在铜中的透入深度）外，并应考虑感应器的力学强度。因为铜板钎焊退火后，塑性较高，极易弯曲变形，导电板厚度常用 4 ~ 5mm。如果有效圈上附带夹具，导电板需承载重量时，板厚可加至 8 ~ 10mm。

（3）有效圈的设计

1）有效圈的板厚。有效圈的板厚应大于 $1.57d_{铜}$，因为在此厚度时导电板的有效电阻最小。当有效圈在没有通水冷却条件下导电时，为增加有效圈的热容量，板厚可增加至 8 ~ 10mm，个别情况下可增至 12mm。这时，有效圈本身即是喷水器，当加热结束后，淬火液喷冷零件的同时，也冷却了有效圈。

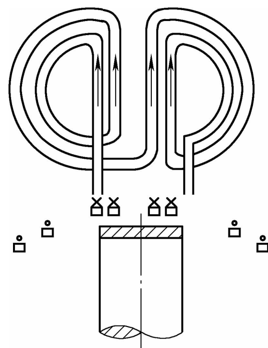


图 7-14　蝴蝶形感应器

2）有效圈的形状。除回线型感应器及容易产生局部涡流集中的零件外，有效圈的形状一般与加热零件的形状相仿。

3）有效圈的宽度。同时淬火时，有效圈宽度 $H_{感}$ 根据零件淬硬区宽度 $H_{零}$ 来选定，有如下两种情况：

①　淬硬区为长轴中间的一段时，由于加热过程中，零件轴向热传导的作用，加热区两端逸散了热量。因此，$H_{感}$ 应大于 $H_{零}$，一般为 $H_{感}=(1.1 \sim 1.2)H_{零}$。

②　长轴中间的一段采用具有台阶的有效圈加热时，$H_{感}=H_{零}$，见图 7-15。

③　零件全长加热时（如齿轮），$H_{感}=H_{零}+a$。式中，a 为零件与有效圈间

隙。

必须提到的是，淬硬区宽度除直接受感应器宽度影响外，与功率密度、加热温度也有很大关系。淬硬区宽度随功率密度增大而增大，随加热温度增高而增大。

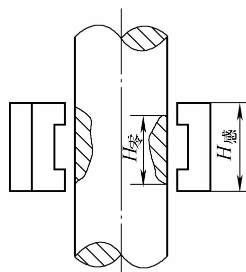


图 7-15　台阶式有效圈

连续淬火时，感应器有效圈宽度与发电机功率有关，如果要使发电机满功率输出，有效圈宽度可按下式计算：

$$H_{感} = \frac{P_{发}}{5DP_{零}}$$

式中　$P_{发}$——发电机额定功率（kW）；

$P_{零}$——零件加热表面的功率密度（kW/cm^2）；

D——加热零件的外径（cm）。

连续淬火时，有效圈宽度太宽会导致轴向过渡区宽度增加，实际生产中有效圈宽度常用尺寸为 14 ~30mm。

4）有效圈与零件加热表面的间隙 a 根据零件加热部位尺寸及定位情况而定。一般工件直径在 ϕ50mm 以下，取 2 ~4mm；ϕ50 ~ϕ150mm，取 3 ~5mm。

曲轴旋转淬火时，由于半环形感应器上装有定位块（间隙块），a 值更小，常取零件直径的 1.5%。

172. 感应器的水冷及喷水装置如何设计?

（1）水冷装置　感应器导电板与有效圈除特别加厚者外，一般均要求通水冷却。感应器出水温度应低于66℃，当有效圈截面较小，为保证能使有效圈得到充分的冷却，可采用提高水压的办法。例如，曲轴环线型感应器采用 0.6MPa 的高压水来冷却。此时，有效圈的载流密度许用值为 $1200A/mm^2$。

（2）喷水装置　感应器喷水装置有两种形式，即利用有效圈本体兼作喷水器及附加喷水器。设计喷水装置时，应注意以下几点：

1）同时淬火时，每平方厘米淬火表面应得到 3 ~4 个喷水孔，一般应成棋盘式交叉布置，见图 7-16。钻孔直径为 ϕ1.5 ~ϕ1.8mm，钻孔中心线应与受冷表面相垂直。

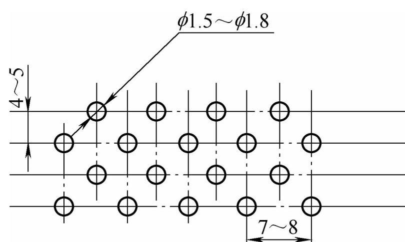


图 7-16　喷水孔的排列间隔

2）喷水器进水管截面积之和一般应大于或等于所有喷水孔截面积之和，这样喷水压不致比进水压低。

3）喷水器进水管进入水腔，要使所有喷水孔同时均匀地喷出水柱，使零件各部分能均匀地得到冷却。

4）扫描淬火时，无论采用感应器喷水或辅助喷水圈喷水，均要保证：喷水不应反溅到正在加热的表面上；加热表面预冷时间（即零件加热终止到喷水开始这一段时间）不要太长，一般不大于1s。否则，零件表面不易淬硬。

预冷时间实际上随间隙、喷水角及零件移动速度三个因素而变。当间隙大、移动速度低时，喷水角（喷水孔中心线与零件轴线的夹角）应大一些，例如45°～60°；当间隙小、移动速度高时，喷水角应选小一些，例如30°～45°。

扫描淬火时，喷水孔径取2mm，圆周孔距取3.5～4mm。图7-17所示为一种不需辅助喷水圈的扫描淬火有效圈。

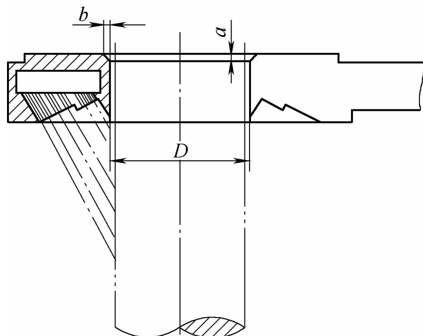


图7-17 不需辅助喷水圈的连续淬火有效圈

173. 感应器上的附加装置有哪些？

感应器上的附加装置及零件有导磁体、夹紧螺钉、螺母、垫圈、绝缘垫片、屏蔽环、定位销、导向套等。这些附件各有功用，大都用非金属材料或非磁性材料制造。设计这些附件时应考虑以下因素：

1）尽可能不在感应器上产生损耗。可以选用如云母板、夹布胶木板、玻璃布板、聚四氟乙烯，玻璃布带，耐200℃的树脂和氮化硅（Si_3N_4）等非金属材料。

2）材料除具有一定的力学强度外，应有一定的热强度，金属零件应为非磁性金属，离有效圈较远的零件可用中、低碳钢制造，但表面应镀铬，以防锈蚀。

3）凡金属零件装在感应器上后，不得使导电部分短路。金属零件本身如为圆环形，应切槽或断开，使成开路，以免产生涡流而发热。

174. 中频感应器在什么情况下需附加导磁体？其导磁体如何设计？

一般在下述三种情况下，中频感应器上需附加导磁体。

1）为提高感应器效率，驱使有效圈上的电流流经距零件加热表面最近的一面，如内孔感应器、平面感应器、齿槽加热感应器及半轴纵向加热感应器等，近年来外圆感应器也有附加导磁体的。

2）迫使电流按一定的途径流动，以获得均匀加热，如分合型曲轴感应器等。

3）屏蔽磁场，以防止有效圈邻近不需受热的部分发热。

中频感应器上的导磁体常用硅钢片制造。硅钢片的厚度：当f=2500Hz时，厚度为0.35mm；f=8000～10000Hz时，为0.2mm。

硅钢片导磁体各部设计尺寸如图7-18所示。图中，$a=H_{感}+(0.5\sim1.0)$mm，$c=(0.2\sim0.75)a$。c的大小与线圈产生的磁通量有关，增大c可以减少磁感应强度，减少铁损。实际生产中，c常不小于5mm，但也有因结构所限，采用

2mm 的。b 应大于 c，一般大于 5mm。

导磁体与有效圈间应绝缘，以前采用 0.5mm 的云母片作绝缘层，近年来已改进使用耐温 200℃ 的导热胶作绝缘层。导磁体应紧紧地固定在有效圈上，为防止硅钢片束受热膨胀而拱起，在有效圈上，常采用在硅钢片间衬垫与硅钢片同尺寸的 Π 形云母片，其厚度为 0.2mm，每 10mm 硅钢片间插入一片。

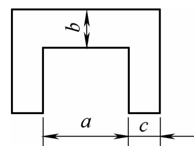


图 7-18　硅钢片导磁体各部设计尺寸

175. 多孔或多加热区的感应器应如何设计？

中频发电机的功率常常很大，因此有可能一次加热多个零件或一次同时加热一个零件的多个区段，以下简单叙述其设计原则。

1）零件加热区为直径相同、宽度不相同的多个区段时，可采用等间隙、不等宽的并联感应器，如图 7-19 所示。

2）零件加热区宽度相同，直径不相同时，可采用等宽度串联感应器，小直径加热区处的间隙应略大，如图 7-20 所示。

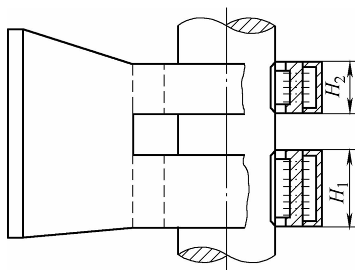


图 7-19　等间隙不等宽的并联感应器

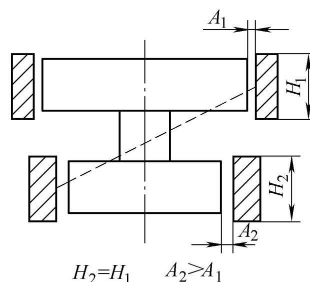


图 7-20　不同直径、等宽度的串联感应器

3）零件为阶梯轴，要求大、小直径处淬硬层连续，应采用纵向一次加热感应器或与轴线成 45°～60°交角的连续淬火感应器，如图 7-21 所示。

4）小零件同时加热或扫描加热均可采用串联的多孔感应器，如图 7-22 所示。

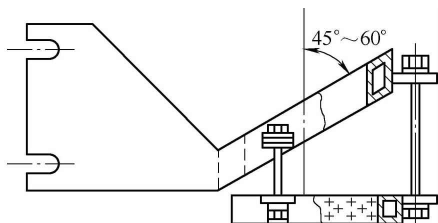
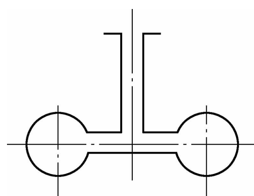


图 7-21　与轴线成交角的连续淬火感应器


图 7-22　串联多孔感应器

176. 什么是直接接到中频电源上的多匝感应器？

对于大齿轮等大型零件，可设计多匝感应器，不经中频变压器而直接与中频电

源相连接，即直接接到中频电源上的多匝感应器。这种感应器的匝数需经计算，其方法与锻坯加热感应器相似，如图 7-23 所示。

177. 导电板结构与感应器效率有很大关系吗？

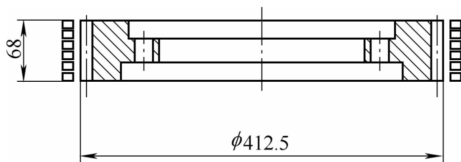


图 7-23　直接接到中频电源的多匝感应器

工艺人员设计感应器时，往往把有效圈结构放在第一位，这是必然的。但是，也应重视导电板的设计，这是因为导电板的结构与感应器效率有很重要的关系。

1）导电板宜宽不宜窄，这样可降低损耗。

2）导电板宜短不宜长，只要不影响夹具位置及淬火机床顶尖中心，导电板越短越好，一般为 100 ~ 250mm。如果确有需要，在感应器与淬火变压器之间可加装过渡的导电板或快换夹头。

3）导电板两板之间有电感，此电感随两板间隙增大而增大。因此，导电板（管）应互相靠近，两板间用聚四氟乙烯板隔开，常为 1.5 ~ 2mm。对承受较高电压的导电板，为防止跳弧，此绝缘板可高出导电板 5 ~ 8mm。

4）将较长的导电管改成较宽的导电板（60 ~ 100mm），其厚度应大于 1.57 倍铜的电流透入深度。导电板可减少阻抗，感应器加热效率会大大提高，高频感应器的加热规范也会得到改善，即栅流减小，阳流与栅流的比值增大。

178. 喷液器应如何设计？

喷液器是感应器的附属部分，也可以是有效圈的本体，它设计的好坏直接影响零件的淬火质量，喷液器设计的要点如下：

1）喷液器必须能包覆整个淬火表面，喷液应均匀。

2）液柱直径根据零件情况，可在 $\phi1$ ~ $\phi2.5$mm 之间，一次加热并易裂的零件，喷液孔可选得小一些，扫描淬火用喷液器、喷液孔可以大一些。

3）为了保证喷射压力，喷液器设计时，要计算进水管截面积与喷液孔截面积的比值。一般应选取进水总截面积等于出水总截面积。在淬火液泵压力足够大而所需喷液压力较低情况下，允许进水管截面积小于出水管截面积。

4）喷液器腔的宽度应不小于 6 ~ 8mm。宽度过小，导致喷液不匀；过大，则喷液反应迟缓，因为水腔中必须充满液体形成压力，才能喷射。

5）为保证喷液均匀，喷液器进水管应均匀分布。早期的经验是采用喷液漏斗，如图 7-24 所示。近年来多采用挡板，如图 7-25 所示。

6）一次加热淬火表面喷液孔的孔间距应交叉布置，因制造、焊缝阻挡等原因造成局部不能钻孔时，可设计偏斜的孔予以补偿，如图 7-26 所示。喷液孔与淬火面的间隙应大于 5mm，比小间隙为好。

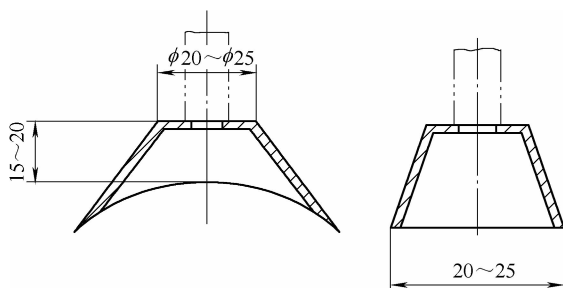


图 7-24　喷液漏斗

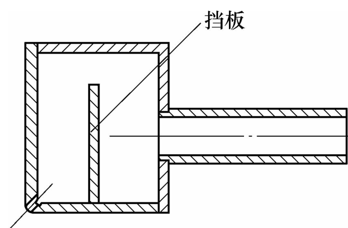


图 7-25　喷液挡板

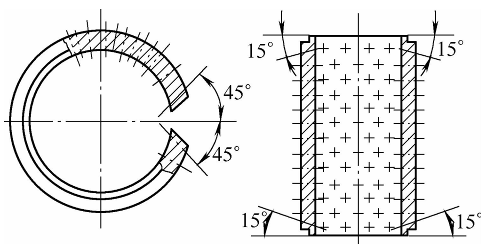


图 7-26　有偏斜角度的补偿喷孔

7）零件旋转加热淬火时，喷液孔的周向间距可以加大，但轴向间距仍应不大于 4～5mm。

8）扫描淬火时，感应器喷液孔与轴线的夹角（见图 7-27），一般为 30°～60°。夹角越小，喷液离加热区越远。此角度与有效圈与工件间隙与扫描速度有关，扫描速度越快，此夹角可越小；间隙越大，此夹角应较大。夹角大于 45°时，常导致喷液反射到加热区，很少选用。

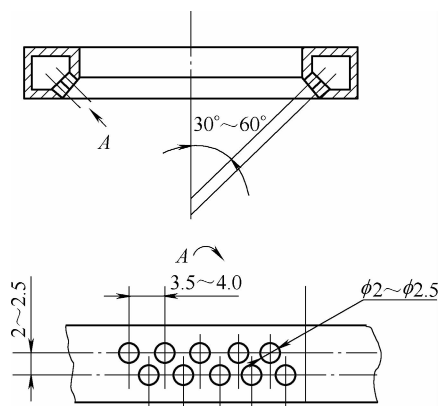


图 7-27　喷液孔与轴线的夹角

9）附加在感应器上的单个喷液圈，一般应可调节与有效圈的距离，而第一排喷液孔应与水平线成 15°角，防止水往上溅。对于一般淬火件，三排向心的喷液孔已足够，如图 7-28 所示。但对淬硬层深的工件，喷液孔排数应增多，否则会引起冷却不足，加热件经过喷液圈后会产生严重的自回火现象。

10）由于喷液器紧靠有效圈，因此，当采用纯铜或非磁性钢制造时，应防止涡流产生。一般喷液圈应有切口，如图 7-29 所示。当采用非金属材料制造喷液器时，不需此切口。

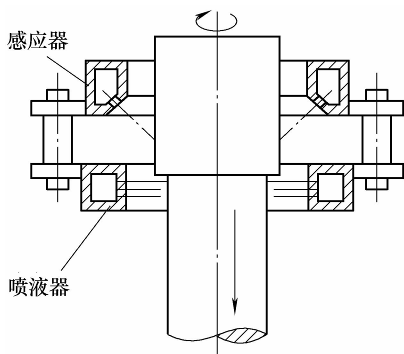


图 7-28　带辅助喷液器的扫描淬火感应器

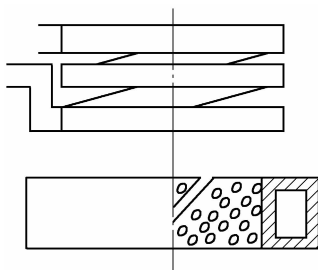


图 7-29　设计切口的喷液环

179. 喷液器的典型结构有哪些?

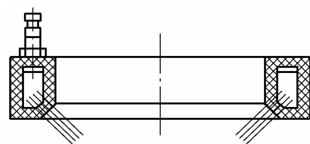


图 7-30　塑料喷液器

1）塑料喷液器如图 7-30 所示，可用玻璃纤维板、聚四氟乙烯或玻璃布板等材料制成。这些材料可以通过机械加工制成本体，进水管接头可用黄铜或纯铜管制成。塑料喷液器常用于半轴等零件的扫描淬火。喷液孔一般为三排，直径为 ϕ2.0mm，喷射角常用 45°。

2）一次加热有效圈作喷液器（见图 7-31），常用于齿轮、齿圈的感应热处理，为使喷液均匀，进水口设计成漏斗型。

3）可调节喷液量的水幕式喷液环如图 7-32 所示。它喷出的液体是一个环面，形成水幕，调节上盖，可使喷液量增大或减小，这种喷液环用于轧辊淬火。

4）不带辅助喷液器的扫描淬火感应器主要用于带法兰的轴的外圆淬火，可使淬硬区离法兰较近，见图 7-17。

5）高低压组合喷液器如图 7-33 所示。高压小流量喷嘴使工件表面快冷到 500℃左右，高压能破坏工件表面蒸汽膜，小流量防止喷液影响加热区。低压大流量喷液盒可使工件缓冷至 200℃左右，防止淬裂。高压喷嘴的窄缝为 0.5mm × 15mm，多个喷液盒上有许多喷液孔。这种高低压组合喷液器，能避免托氏体产生，并得到高硬度，有效淬硬层深度也能得到提高，特别适用于滚珠丝杠的淬火。

6）台肩轴台肩部分喷液环结构。轴的台肩部分同时加热并淬火时，如果采用一般喷液环，常使轴肩圆角处产生软带。图 7-34 所示为消除轴台肩处软带的喷液器。

对台肩轴扫描淬火时，如果大直径位于上方进行垂直扫描淬火，由于大径上的淬火液流不到小径上。此时小径部分会产生很高温度的自回火。为此，这种喷液器要加宽，保证小径段有足够的淬火冷却。

7）平板式喷液器（见图 7-35），常安装在淬火机两侧，用于喷淬小轴，转向节花键部分等。

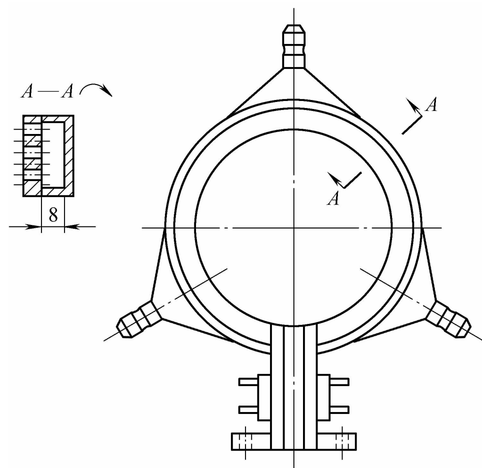


图 7-31　一次加热有效圈作喷液器

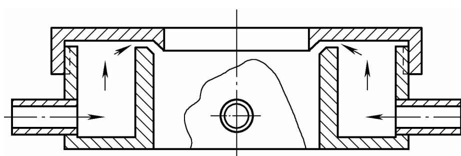


图 7-32　水幕式喷液环

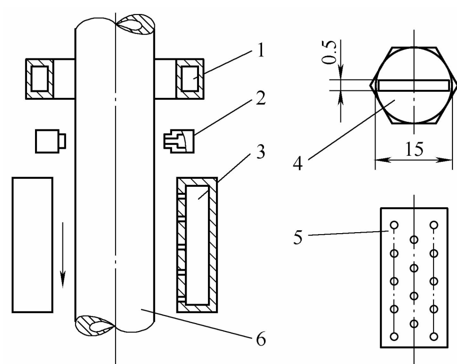


图 7-33　高低压组合喷液器
1—感应器　2、4—高压小流量喷嘴　3、5—低压大流量喷液盒　6—工件

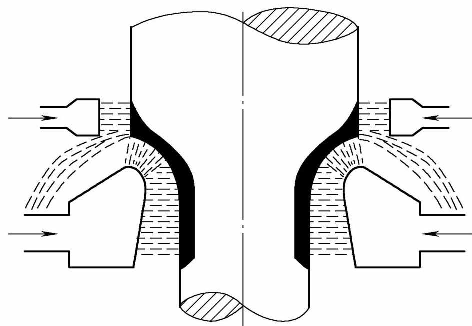


图 7-34　消除轴台肩处软带的喷液器

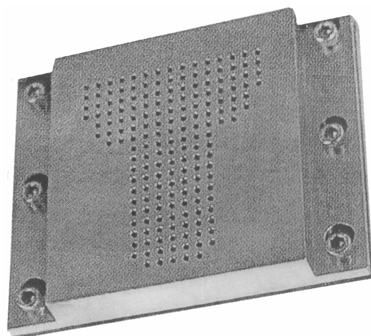


图 7-35　平板式喷液器

180. 感应器有效圈冷却水流量应如何计算？

感应器冷却水流量不够时，出水口温升会过高，影响感应器使用寿命。合适的出水温升一般控制在 25℃左右。资料列出了感应器水流量的计算公式（此公式单位为英制）：

$$GPM = \frac{PK_1K_2}{K_3\Delta T}$$

式中　GPM——感应器合适水流量[USgal/min（1USgal/min＝3.78L/min）]；

P——感应器上总功率（kW）；

K_1——管路系数，感应器加热时，一般用 0.5；

K_2——Btu 与 kW·h 的转换常数，$K_2=3415$；

K_3——水热容量转换常数，$K_3=500$；

ΔT——冷却水允许温升，一般为 40℉（22.22℃）。

例：当感应器上总功率为 100kW 时，

$$GPM=\frac{100\times0.5\times3415}{500\times40}\text{USgal/min}=8.5375\text{USgal/min}=32.3\text{L/min}$$

181. 感应器（或喷液器）当增高压力时，它的流量如何变化?

众所周知，管道截面一定时，提高水压能增加流量。对于有效圈截面小的感应器，采用压力达 1MPa 的冷却水已为一些工厂采用。图 7-36 所示为感应器喷液孔流量随压力变化曲线（图中 1gal/min = 3.78L/min = 63mL/s，$1\text{lbf/in}^2=\frac{1}{14.22}\text{kgf/cm}^2=6.9\text{kPa}$）。

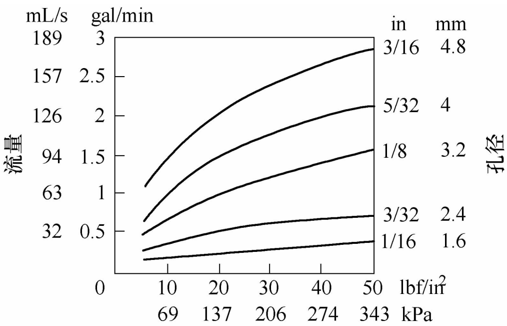


图 7-36　感应器喷液孔流量随压力变化曲线

182. 什么是无触点开合感应器?

1）早在 20 世纪 60 年代，前苏联高频电流科学研究院研制出了一种无触点开合感应器，如图 7-37 所示。这种感

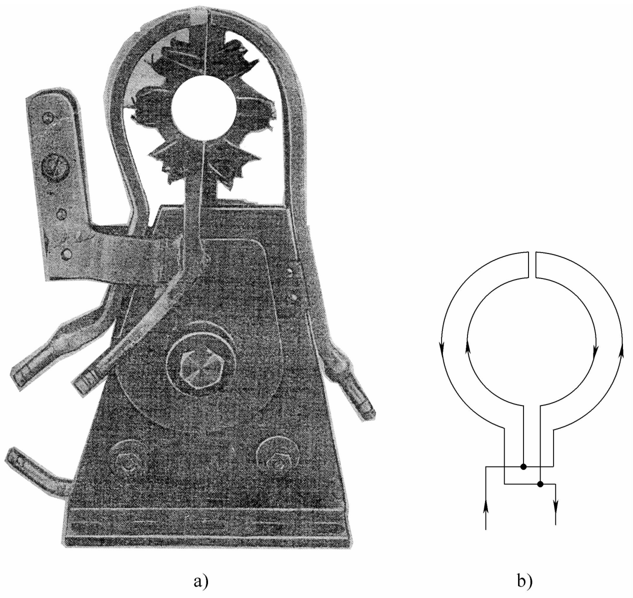


图 7-37　无触点开合感应器

a）实物　b）电路图

应器在锅炉厂用于管子焊接，取得良好的使用效果。为提高感应器的效率，感应器上镶装导磁体。在电源频率选用上，对 ϕ25 ~ ϕ60mm、壁厚 3.0 ~ 4.0mm 的钢管采用 8kHz 电源；对 ϕ89.0 ~ ϕ168.0mm、壁厚 5.0 ~ 8.0mm 的钢管，采用 2.5kHz 电源。

2）美国 INDUCTO HEAT 公司在 20 世纪末开发出的无触点开合型感应器如图 7-38 所示。

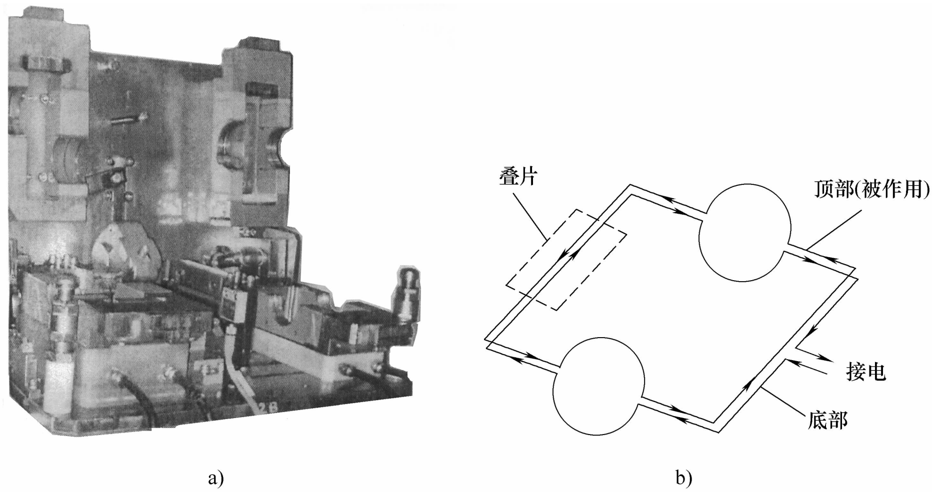


图 7-38　美国 INDUCTO-HEAT Co. 研发的曲轴颈开合感应器

a）实物　b）电路图

两种感应器的电路是不同的，后者是利用主线圈一次绕组交连副线圈（二次绕组）而形成闭合的环流。

183. 双孔或多孔感应器设计时应注意什么？

1）对称布置与前后串联效果不一样。图 7-39 所示为双孔凸轮轴感应器。图 7-39a 是对称布置，左右两孔的加热效果基本相同，因为两个有效圈上电流相同，磁场相同。图 7-39b是前后串联布置，虽然有效圈内径相同，通过电流相同，但第一个孔受到两种影响，降低了加热效率，第一个影响是它有两个开缝，该处磁场减弱；第二个影响是电流有走捷径的特性。这种中频感应器，如果铜板较厚，则走捷径倾向增加。因此，在第一个孔靠近开缝处应附加导磁体来调节磁场强度。

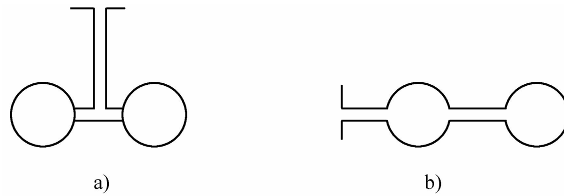


图 7-39　双孔凸轮轴感应器

a）对称布置　b）前后串联

2）多孔感应器在串联到最后一个有效圈时，由于有效圈只有一个开缝，为平衡磁场强度，将有效圈内径加大，起到同样效果，如图 7-40 所示。

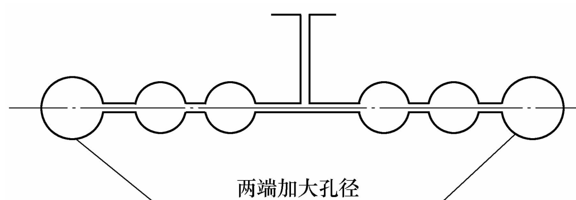


图 7-40　多孔串联感应器两端孔加大内径示意图

3）多孔感应器两孔中心距应大于孔径的 1.5 倍，否则电流会走捷径。

184. 什么是磁通截留器？其主要功能是什么？

磁通截留器（Robber）也称短路圈，如图7-41所示。它是由铜管制成的短路环，中间通水冷却。

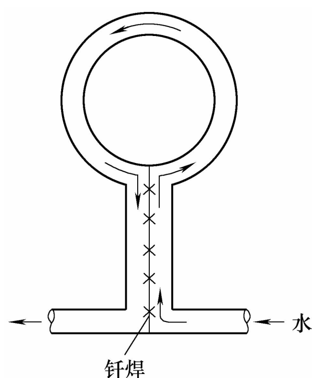


图 7-41　典型的磁通截留器

其主要功能是：放在有效圈附近或两个有效圈之间吸收磁场，短路环受到有效圈磁场作用后，产生涡流，这个涡流产生的磁力线与有效圈产生的磁力线方向相反，起抵消作用。生产实践中，这种磁通截留器应用在钟形壳内球窝加热感应器上，调节截留器与内球窝端部的距离，可改变内球窝端部的温度。这种截留器也使用在多个凸轮加热的感应器上，防止凸轮有效圈产生的磁力线影响邻近的凸轮。

185. 什么是集流器？其主要功能是什么？

集流器（Concentrator）也称为强流器，是装在感应器上的一个组件，其结构如图 7-42 所示。它和感应器的关系，类似变压器的一次绕组与二次绕组。集流器是二次绕组，集流器对工件又是一次绕组与二次绕组的关系，此时，被加热工件成为二次绕组。

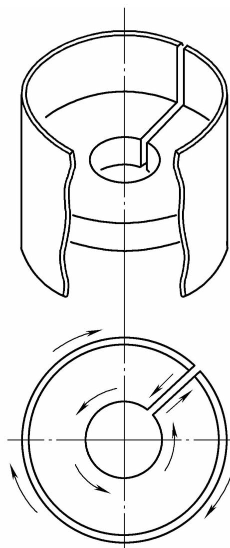


图 7-42　典型的环状集流器结构

集流器的主要功能可归纳为以下四种：

1）用在高频感应设备上加热面积小的零件，由于零件加热面积太小，感应器难以设计成多匝时，采取集流器可使感应器获得较大的功率并传递到零件上。

2）可提高加热表面某一局部的功率密度，由于该局部被集流器包围着，使有效圈增加了长度，因此，分配到局部面积上的功率增加，实现

了局部集流，提高了功率密度。

3）可调整淬硬区宽度，集流器与感应器有效圈之间通过云母片绝缘定位，两者之间的相对位置允许少量调整，当淬硬区域需要调整时，可以通过集流器位置的移动来调整。

4）采用集流器便于感应器进入加热部位，集流器可在感应器中取出或放入，对难以进入有效圈的零件如曲轴、凸轮轴等，解决了进入感应器的难题。

集流器由于有以上四种功能，虽然使感应器结构复杂了并增加了能耗，但在生产中仍得到应用。

186. 集流器的典型结构有哪些?

（1）盘式集流器（见图 7-43）　当一个小矩形的表面要求加热时，线圈不能做得那么小，只能用盘式集流器。该感应器是一个多匝盘香式线圈（一次绕组），而集流器是一片盘状铜片带一钩型结构（二次绕组）。多匝的盘香线圈具有较大的阻抗与安培匝，产生较大的磁场，耦合的二次绕组铜片上产生的涡流在弯钩处形成的高电流密度和磁场将小矩形件很快加热。这个集流器还能任意旋转角度，以适应特殊工件需要。

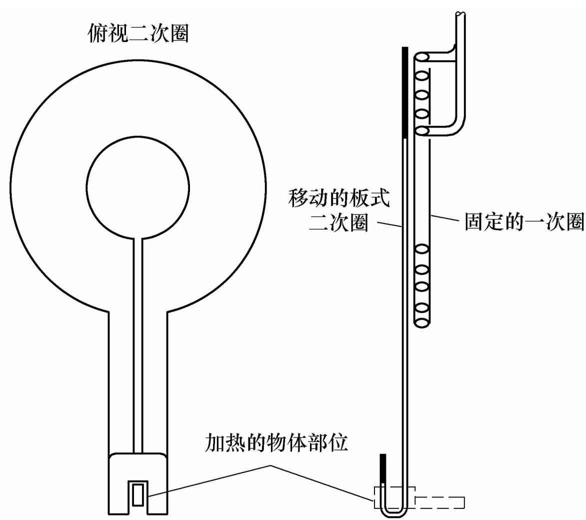


图 7-43　盘式集流器

（2）加热小零件表面和密集能量型集流器　因为小轴件加热部位表面积小，采用多匝感应器有一定困难，若采用单匝则负载轻，反射电阻小，无法与高频设备相匹配，调不出合适功率。采用图 7-44 所示的感应器结构可设计成多匝（4 匝），由于要包容集流器，有效圈内径也大，负载大，设备功率可调。在 60kW、400kHz 单回路高频设备上电规范如下：阳压 11kV，阳流 5A，栅流 1.5A，加热时间为 2s，可得到满意结果。

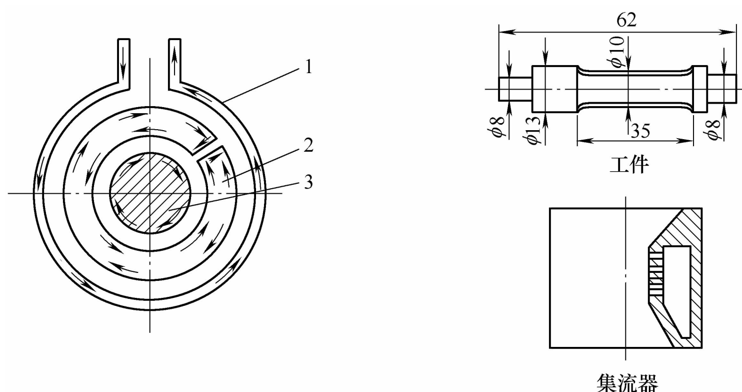


图 7-44　小轴件加热集流器示意图

1—多匝感应器　2—带喷液的集流器　3—小轴

（3）轴杆端部集流器（见图 7-45）　该感应器加热轴杆四个部位，即大直径外圆（下部）、圆柱部圆角（过渡处）、圆柱面（中段）与轴端（上段），有效圈是串联各段组合起来的。由于轴杆直径很小，两根纵向矩形管能很快将此段加热；而轴端是借圆弧段加热的，要使此段温度与杆部相匹配，必须加大此段的有效圈长度才能分配到足够的功率。图 7-45 中集流器的功率来自加大直径的轴端部有效圈，这样的集流器使轴端部温度与圆柱部相一致，不会产生轴端逐步变浅的过渡区。这种设计只用于直径小的轴杆端部。

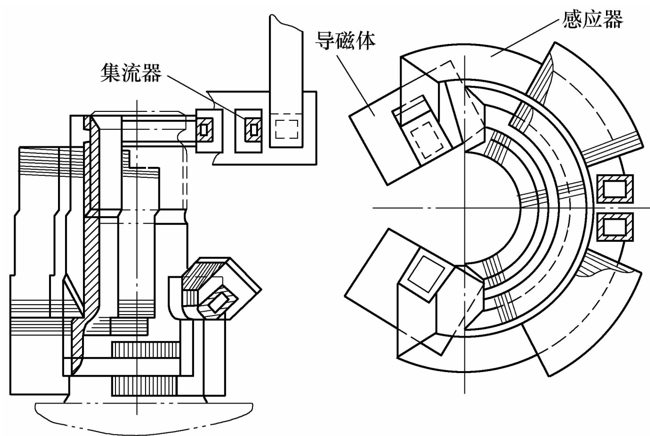


图 7-45　轴杆端部集流器

（4）可移动的集流器　图 7-46 所示为一种可移动的集流器，形成封闭回路的集流器放置在一个多匝的感应器内（一次绕组），集流器的工作部分是一个发夹状的有效圈，根据工作需要此集流器可在感应器内作往复的左右移动。本例的特点是

用多匝的一次绕组能取得电源的较大功率，再传到需要移动的一匝的有效圈部分。

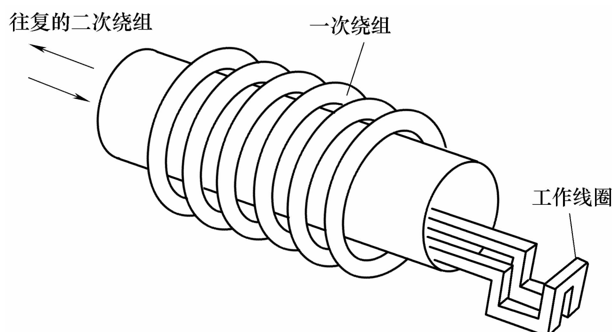


图 7-46　可移动的集流器

187. 内孔加热感应器有何特点?

内孔加热感应器的特点是利用外磁场加热。对圆环感应器，由于环状效应电流一般在导体的内侧流过，因此，它与加热表面的间隙取决于铜管的截面厚度。内孔加热感应器如图 7-47 所示，b 越大，间隙越大，加热效率越低。因此，内孔感应器设计上除尽量减少铜管截面厚度外，一般是镶装“Π”形导磁体或在内部放上磁心，强迫电流走外侧，这样减小了间隙，提高了加热效率。

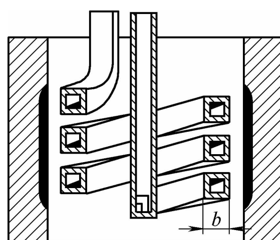


图 7-47　内孔加热感应器

188. 内孔淬火感应器有几种类型?

内孔淬火感应器与外圆加热感应器一样，也有单匝与多匝的结构。

（1）单匝内孔感应器（见图 7-48）　单匝内孔感应器比较简单，常用于内表面较窄的一次加热（感应器宽度一般小于 20～30mm）或扫描淬火；对较宽的加热表面，如果采用单匝感应器，则电流会过大，导致感应器导电板损耗增大。单匝感应器最小外径一般在 15mm 左右，其设计基本数据为：磁心 $D_{内}$ 设为 8mm；铜管壁厚为 0.5mm；径向通水腔宽 2.5mm。这种感应器装有高频导磁体，其结构是上下两块法兰盘相叠在一起。

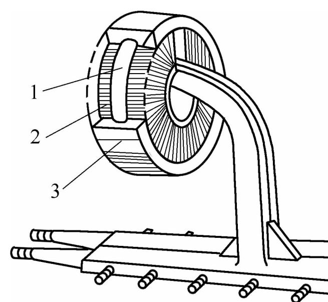


图 7-48　单匝内孔感应器
1—有效圈　2—导磁体　3—轴承环

（2）多匝内孔感应器（见图 7-49）　对较宽加热区的内孔可使用多匝感应器，其结构与单匝相似，不同的是必须从中间拉出一根返回管，如果用可加工导磁体，其导磁体一般由三段组成，上下两段为盘状，中间一段是管状。多匝内孔感应器的冷却水路要注意的是：中心管必须连接到进水口，

否则容易烧坏。

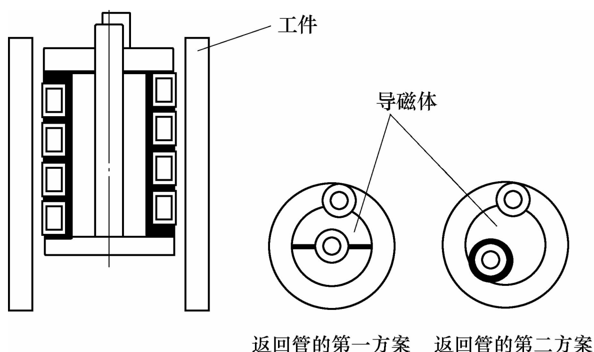


图 7-49　多匝内孔感应器

（3）U 形结构内孔感应器（见图 7-50）这种感应器必须镶装导磁体，导磁体呈两个半环状，以防匝间短路，U 形感应器用于最小直径为 ϕ13mm 的内孔，可以用于在长度方向孔径变化或壁厚变化的内孔，为此，导体截面可在长度上变化或导磁体尺寸在长度上变化。生产实践中发现，U 形感应器对内孔加热，在淬硬层长度方向上常出现两头层深深而中间浅的弊病。

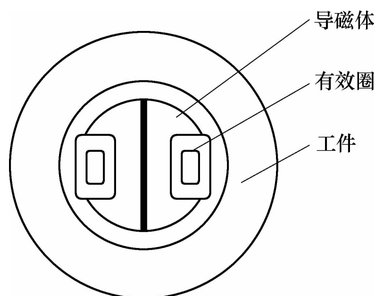


图 7-50　U 形结构内孔感应器

189. 缸套内表面淬火感应器有何特点？

缸套内表面一般采用扫描淬火，由于缸套壁薄，内表面加热淬火时，缸套外圆表面上还有辅助喷液器冷却，可减少缸套变形。缸套内表面淬火感应器见图 7-51。其特点如下：

1）采用同心母线，由三层铜管组成，最内层与 2、3 层铜管间通入淬火液，直接从喷液孔喷出。

2）装有“Π”形导磁体。

3）有效圈下面有装有定位销钉的胶木盘，防止工件与有效圈相碰。这种内孔感应器加热效率较高，在 8kHz 电源、淬 ϕ123mm 内孔、140kW 输出功率时，扫描速度可达 10.7mm/s。

190. 长内孔淬火感应器设计的特点有哪些？

1）导电部分长度特长，损耗大。

2）导电部分细而长，刚性差，必须有依托，使有效圈与工件保持恒定的间隙。

3）有效圈冷却水与淬火液的供给在狭小的空间内布置比较困难。

4）如果淬火机是卧式的，对淬火液的排放，还必须作周密的考虑，绝不能让

淬火液返回到加热表面。

191. 超高频电源可否用于小内孔淬火？

采用高频电源，在我国还很难进行 ϕ15mm 以下的小内孔淬火，因为通水铜管直径使用到 ϕ3mm 以下不容易，多匝感应器至少要有三个铜管截面加间隙才能制成（其中一根是从中间返回的铜管），此尺寸即达 13mm 左右。但是使用超高频电源，铜管直径可以更细一点，即超高频电源可以用于更小内孔的淬火。图 7-52 所示是采用超高频电源淬火的支座内孔，采用的电源是 SP-50，2.5MHz，50kW，其加热时间为 0.2s，淬硬层为 0.1～0.3 mm，整个工作周期为 24s/件。此项目是日本某公司专利。

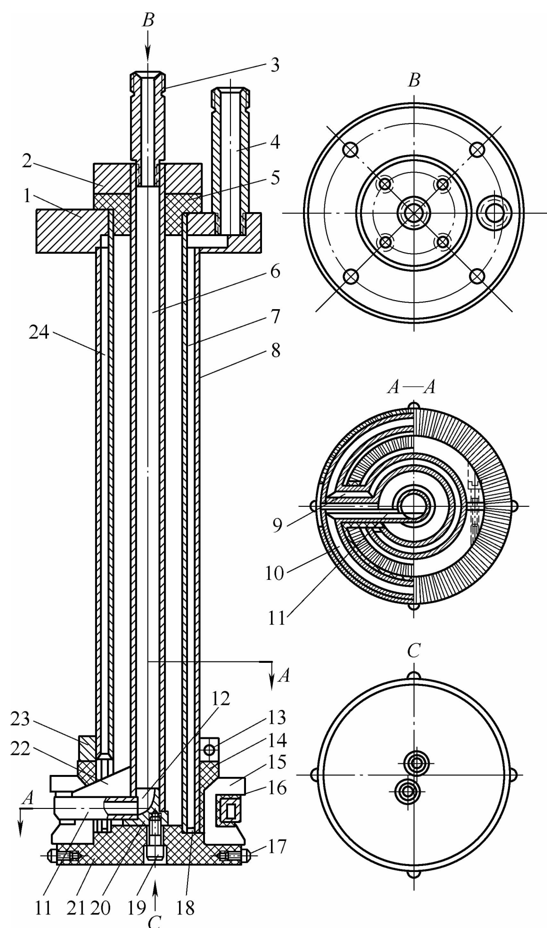


图 7-51　缸套内表面淬火感应器

1—外法兰馈电头　2—内法兰馈电头　3、4—管接头　5—隔套　6—内导电管　7、8—外导电管　9、11—横导管　10—有效圈　12—铣沟道　13、19—螺钉　14—环　15—导磁体　16—绝缘层　17—定位销　18、20—塞子　21—圆盘　22—肋板　23—紧环　24—环腔

192. 两个凸轮靠得很近时，应如何设计感应器？

凸轮轴两个凸轮靠得很近时，如果只加热一个凸轮，则另一个凸轮的相邻侧会受到磁场影响而加热。设计感应器时，应考虑以下措施：

1）先加热下边的凸轮，并在感应器下边装一喷液圈长时间喷液，此时上面的凸轮虽然亦略加热，因还未淬火，无回火影响的弊端；其后加热上面凸轮，此时，已淬火的下边凸轮虽受到磁力线的影响，但有喷液器冷却不会加热回火。

2）在感应器上装屏蔽磁场的导磁体或磁场截流器，但这种感应器有较大损耗，装截流器时损耗更大。

3）将两个凸轮用一个宽感应器同时进行加热，如果有效圈不采取措施，则两个凸轮的中线侧会比两个外侧温度高，淬硬层不合格，近中线侧深而外侧浅。某生

产企业在生产中，将有效圈中间部分车一个宽 10mm、深 3mm 的凹槽（见图 7-53），以降低该处磁场，得到较好的效果。

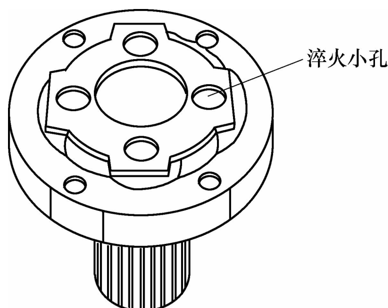


图 7-52　采用超高频电源淬火的支座内孔

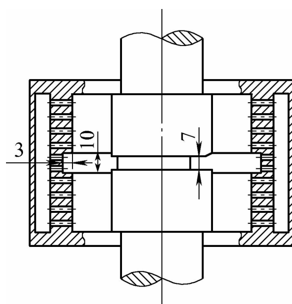


图 7-53　双凸轮加热感应器有效圈结构

4）随着工艺的进步，凸轮感应淬火新工艺与感应器亦不断涌现，如采用仿凸轮形感应器，利用淬火机的数控与多轴功能，在加热凸轮过程中，凸轮基圆侧间隙会自动调小，可提高基圆部位温度。另一个新工艺是将进、排气凸轮与油泵凸轮三者的三个感应器接到各自的电源，靠得很近的凸轮可同时按各自的工艺同时进行加热淬火。这种感应器如图 7-54 所示，图中仅显示出两个，上边是气门凸轮仿形感应器，下边是油泵凸轮感应器。



图 7-54　三个凸轮的感应器（照片仅显出两个）

193. 同时进行双滚道淬火的感应器有何长处？

对于双滚道的感应淬火，如果每次进行一个滚道淬火，则第二个滚道淬火时会对第一个滚道产生回火作用，特别是当两个滚道相距较近时，矛盾更为突出。国内多家公司已采用双滚道同时扫描淬火技术。图 7-55 所示为同时进行双滚道淬火的

感应器，有效圈上均装有导磁体。

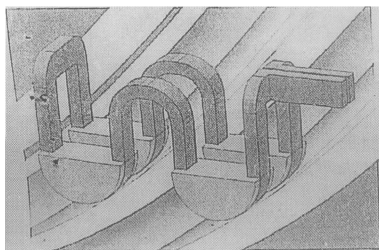


图 7-55　同时进行双滚道淬火的感应器（SMS-ELOTHERM 公司）

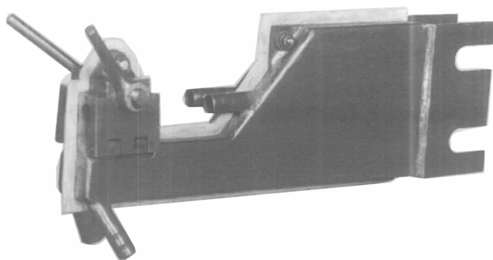


图 7-56　插管式快换感应器夹头

194. 快换感应器夹头的典型结构有哪些？

快换感应器夹头的主要目的是节省更换感应器的时间与简化操作，但是也要兼顾到夹头本身的功率损耗。下面列举几种快换感应器夹头的典型结构。

1）图 7-56 所示插管式快换感应器夹头是国内较通用的一种高频感应器用夹头。感应器导电管由半圆块夹紧，半圆块可以展开并合拢，然后由手把夹紧。铜管可直接插入通水连接的橡胶水管，由于水压不高，橡胶管与铜管配合紧密，可不加管箍，在生产中使用方便。

2）图 7-57 所示感应器快换夹头的正前方中间是感应器的插入口，两个密封环是感应器的进出水口。当具有标准结构的连接块的感应器进入插入口后，拧动手把 3，胶木压块将连接块压贴到插入口的底面上，水、电连接一次完成，更换感应器时，可将进水阀关闭。这种结构更换一个感应器约 10s，大大提高了工作效率。这种夹头已在生产中广泛使用，较适用于 60kW 以下的高频感应加热设备。

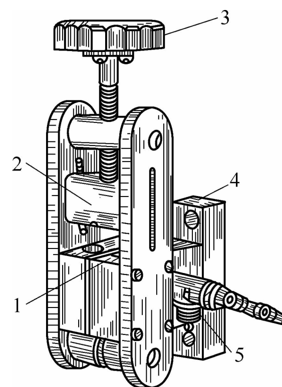


图 7-57　感应器快换夹头
1—密封环　2—压块　3—手把
4—接触板本体　5—进水阀门

3）图 7-58 所示高、中频通用感应器快换夹头由本体、手柄、压板、压紧螺丝、挡板等组成。标准结构的感应器接触板从插入口向里进入，碰到定位挡板 5 停止，向外转动左右二个手柄 1，只需转动不到 90°，即能将感应器压紧，因为压紧螺丝螺距大，并且是一左、一右的。本体上密封环处是进出水口。这种快换夹头接触面较大，适用于 200kW 以下的高、中频电源。国内已有产品，并广泛应用，水电连接一次完成的时间约为 15s。

4）图 7-59 所示为中频感应器快换夹头。感应器插入后，扳动手把，顶上的凸轮将压块下压，使感应器贴到夹头的导电面，本体上面有 ϕ12mm 的进出水孔，并有密封环，防止漏水。这种夹头适用于中频 200kW 左右电源使用。

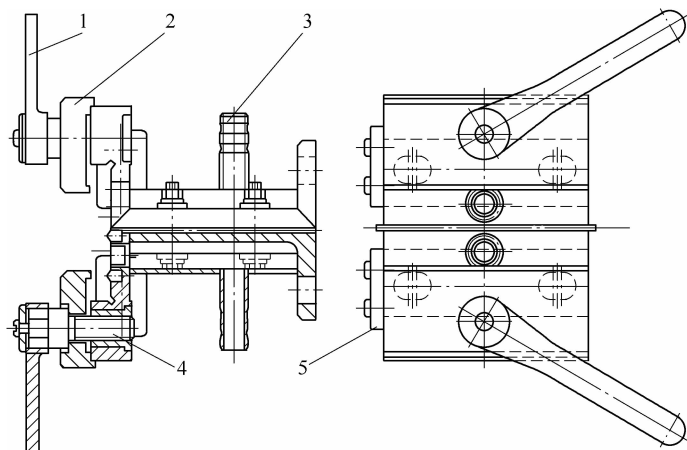


图 7-58　高、中频通用感应器快换夹头

1—手柄　2—压板　3—进出水管　4—压紧螺钉　5—定位挡板

195. 加热兼喷液的有效圈与通有冷却水只能加热的有效圈各有什么优缺点?

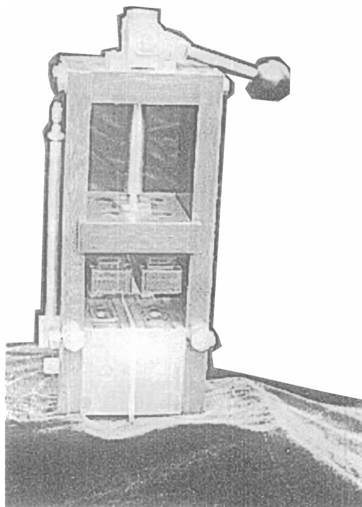


图 7-59　中频感应器快换夹头

生产上有两种有效圈：一种是既加热又兼喷液的有效圈；另一种是通有冷却水只能加热的有效圈，喷液需另备喷液器。

1）采用既加热又兼喷液的有效圈加热时，一般不通水（或在两端焊常冷铜管）。为具备一定热容量，常用厚铜料制作，壁厚在 6～12mm 之间，用材多，加工钻孔费工；喷液时工件占据了有效圈的位置，影响变频器的负载系数。此外，有效圈在喷液时已有一定的温升，如果淬火液中含有盐、钙类杂质或添加剂，喷液孔截面积会逐渐缩小，对自回火工艺产生影响，如果不采取经常清洗措施，因喷液流量减少，工件自回火温度会逐渐升高影响产品硬度。其优点是结构简单。

2）只具加热功能的有效圈常由铜管制作，由于是通水冷却的，因此，有效圈不会升温，使用寿命长。北京某厂的经验是凸轮轴感应器采用另制喷液器淬火时，感应器寿命由 15000 次提高到 90000 次。另外，由于工件在喷液器中冷却，不占有效圈的工件位置，若为多个凸轮的这类工件，一个凸轮在喷液器中冷却时，另一个凸轮可在有效圈中加热，既提高了变频器的负载系数，又提高了生产率。

196. 如何选用单匝与多匝感应器?

单匝与多匝感应器各有特点，单匝感应器结构简单，便于设计与制造，一般情况上，如果单匝感应器在宽度与电源设备相匹配方面均能适应时，应首选单匝感应器。但是，单匝感应器与多匝感应器相比，在使用相同功率条件下，感应器电压低，电流大。因此，对导电板来讲，相同长度时，其损耗就大；而多匝感应器在相同功率下，感应器输入电压高，电流小，导电板损耗就小，感应器效率就相对要高。另一种简单的解释是：感应器上的电压是按导电板长度和有效圈展开长度之和分配的，如果导电板长度很长而有效圈展开长度很短，则功率的大部分消耗在导电板上，采用多匝感应器就是增加有效圈展开长度，有效圈分配到的电压和功率相对地增加了。因此，现在直径小、宽度宽的工件，大都采用多匝感应器。不过，多匝感应器制造较复杂。

对高频感应器，多匝小直径感应器常比单匝的效率为高，其原因即在于此；但是匝数也不能过多，因为受设备调谐所限制，匝数过多导致振荡管栅流过大，阳流与栅流之比不合适。

197. 多匝感应器比单匝感应器优越的实例有哪些?

1）等速万向节钟形壳球窝内孔加热感应器早期的设计是采用单匝，其优点是制造简单。近年来多家公司改用双匝感应器，其原因是单匝感应器电流大，导电管部分常易烧断，改为双匝感应器后，有效圈电流减小，导电管部分故障减少。

2）某生产企业曾对轿车凸轮轴采用单匝、双匝及八匝（各对应一个凸轮部位）三种感应器进行感应淬火试验，其电耗结果见表 7-8。

表 7-8　不同匝数感应器加热轿车凸轮轴凸轮部位工艺及电耗

感应器类型	一次淬凸轮数	工艺参数					淬一根凸轮轴	
		频率/Hz	功率/kW	加热时间/s	冷却时间/s	总时间/s	电耗/kW·s	工艺时间/s
单孔单匝	1	8000	50	5	5	10	2000	80
双孔串联	2	8000	80	5	5	10	1600	40
八匝	8	8000	230	5	9	14	1150	14

从表 7-8 得知，八匝感应器同时加热八个凸轮的电耗为单匝的 57.5%，为双孔的 71.8%，工艺时间亦相应缩短。

3）汽车发动机电枢轴单匝与双匝感应器对比试验，感应器主要参数见表 7-9，工艺及淬火结果见表 7-10。

表 7-9　两种感应器主要参数

感应器匝数	内径/mm	载流截面/mm^2	内径周长/mm
1	22.5	10×2	70.7
2	22.5	5×2	141.4

表 7-10　工艺及淬火结果

感应器匝数	电参数				折算功率/kW	扫描速度/(mm/s)	加热时间/s	电耗/kW·s	淬硬层深度/mm
	阳压/kV	槽压/kV	阳流/A	栅流/A					
1	12	6.5	1	0.2	11.05	7	10	110.5	0.6
2	10	7.2	1.3	0.3	15.9	18	3.9	62	0.6

在淬火结果相同、两匝感应器在阳压低的情况下，回压、阳流增高，扫描速度明显加快，电耗下降，其原因可归纳如下：两匝感应器使回压上升，感应器端电压也上升，双匝有效圈阻抗比单匝的高，有效圈上分得的功率相应增加，虽然阻抗增加但端电压增加，总功率亦增加，而阳流、栅流比还是在最佳范围，因此得到节能、高效的好结果。不过匝数并不是越多越好，因为它会导致阳流、栅流比不合适，有时会得到不好的结果。

198. 工件采用扫描淬火感应器或一次加热感应器，其能耗对比有否实例?

汽车半轴传统的感应淬火工艺是扫描法，其优点是电源功率小，机床、工装通用性强，但能耗高；现在发展为一次加热新工艺，采用矩形管纵向一次加热，特点是节能、生产率高，但电源功率大，机床工装必须专用。汽车半轴扫描淬火与一次加热感应淬火能耗对比见表 7-11。

表 7-11　汽车半轴扫描淬火与一次加热感应淬火能耗对比

淬火方式	感应器	淬火能耗			回火能耗/kW·h	总能耗/(kW·h/件)	生产率/(件/h)
		功率/kW	加热时间/s	能耗/kW·h			
扫描淬火	圆环形	90	195	4.85	0.56	5.44	12
一次加热感应淬火	矩形管	300	50	4.17	0（自回火）	4.17	36

感应加热回火能耗：$40\text{kW} \times 50\text{s} = 0.56\ \text{kW} \cdot \text{h}$。

从表 7-11 可知，半轴一次淬火能耗每件节省 1.27 kW·h，生产率大大提高。

199. 感应器有效圈上喷陶瓷涂层有何效果?

有效圈与上面镶装的导磁体在工作过程中要承受工件上的辐射热，有效圈上喷上陶瓷涂层，能减少铜及导磁体接收到的热辐射，特别是对导磁体温度升高起阻止作用。这是因为陶瓷涂层既是热的不良导体，又是绝缘体，还能防止铁屑产生匝间短路、打火等弊端。

200. 导磁体的作用是什么?

导磁体是一种控制磁通量的元件，它可以屏蔽、集中或偏移磁场，使感应加热区得以控制。导磁体的作用见图 7-60。由图 7-60 可看出，采用导磁体后，首先，

外部磁场消除了，线圈覆盖零件面的表面功率增大（相同线圈电流情况下）；其次，线圈覆盖区外的功率减小，即加热区缩小而更准确，但此时由于线圈上的电流被驱到铜管表面，铜管导电截面减少，铜管表面的电流密度增大，实际上铜管的电阻与电感也增大了。

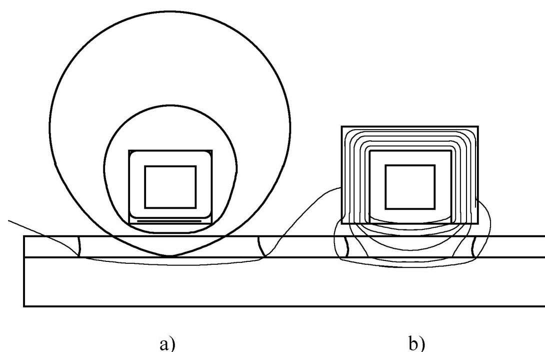


图 7-60　导磁体的作用
a）未加导磁体　b）加导磁体

201. 多匝感应线圈两端镶装导磁体有何效果？

多匝感应线圈两端镶装导磁体可改善淬硬区宽度。下面举例说明：ϕ12.7mm 的齿轮轴上长 63mm 中间段需要淬火，采用多匝感应器，为提高产量，工件不转动，淬火的结果是淬硬层不匀，一侧宽，另一侧窄，见图 7-61a；将多匝感应器有效圈两端加上导磁体后，左右淬硬区宽度趋向一致，见图 7-61b。

202. 导磁体是否可用作屏蔽？

导磁体可用作屏蔽。导磁体用作屏蔽的最多实例是应用在凸轮轴感应器上。

图 7-62 所示为导磁体粘在有效圈底面作屏蔽板。图 7-62 中的工件法兰面不需淬硬，而淬硬区要求离法兰面较近。解决的办法是在有效圈底面粘上导磁体，见图 7-62c，此屏蔽板既可用可加工导磁体，也可用硅钢片。前者用粘接剂粘接，后者用锡焊或银焊焊接。

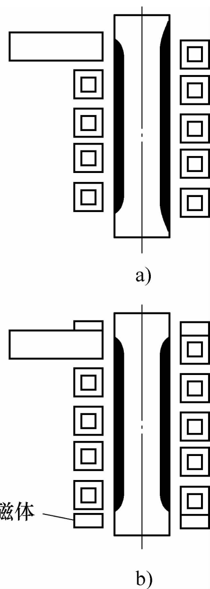


图 7-61　多匝感应线圈两端镶装导磁体可改善淬硬区宽度
a）未加导磁体　b）加导磁体

203. 导磁体反装有什么作用？

导磁体反装可避免工件相对应部位加热。图 7-63 所示为导磁体反装的离合器片感应器。该感应器在对应离合器片不需加热的部位将导磁体反向镶装，可避免离合器片相对应部位加热。

204. 导磁体有多少品种？

导磁体是软磁材料，其品种在不断增加，现在应用在感应加热上的主要有钢的叠片（Lamination）、铁氧体、可加工导磁体与非晶芯纳米晶芯等，前三种已使用多年，后两种正处于开发试用阶段。

1）钢的叠片主要为硅钢片，早期只用于工频及中频，由于冷轧取向硅钢片制

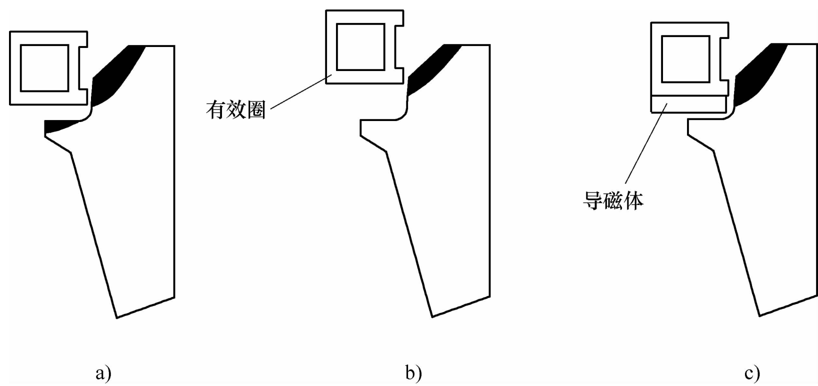


图 7-62　导磁体粘在有效圈底面作屏蔽板

a）未屏蔽　b）淬硬区离法兰面太远

c）采用导磁体屏蔽不需要淬硬的部位

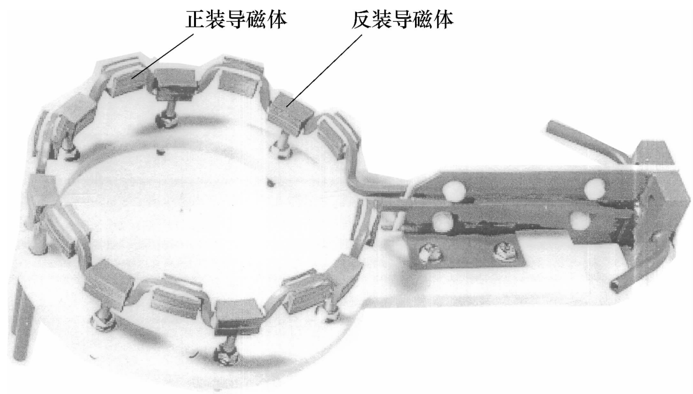


图 7-63　导磁体反装的离合器片感应器

造技术的进步，现在高频、超音频感应器上也开始使用 0.05 ~ 0.10mm 厚的薄硅钢片作导磁体了。

2）铁氧体主要用于高频感应器，国内产品品种规格很多，价格低廉，但性能上有差异，居里点温度一般 < 200℃，但也有达到 500℃的。铁氧体导磁体的主要缺点是不好加工，热震性差，易脆断，使用寿命低。

3）可加工导磁体亦称为磁介质材料。它由铁粉与绝缘的粘结材料经混合压制、烧结而成，针对不同使用频率，有不同的牌号。国内可加工导磁体研制较晚，产品质量正在不断提高。美国 Fluxtrol 公司生产的可加工导磁体见表 7-12。

表 7-12 美国 Fluxtrol 公司生产的可加工导磁体

牌号		Fluxtrol A	Fluxtrol 50	Ferrotron 559H	Ferrotron 119
产品颜色		绿	黄	灰	黑
密度/（g/cm^3）		6.6	6.1	5.0	4.8
工作频率区/kHz		3～30	50～500	50～1000	100～1000
初始磁导率		63	36	16	7
最大磁导率		120	55	18	8
饱和磁通密度/T		1.6	1.5	1.0	0.8
耐温/℃	长期	250	250	250	250
	短期	300	300	300	300
电阻率/kΩ·cm		0.5	10.0	>15	>200

注：初始磁导率指磁场强度趋于零时的磁导率极限值；最大磁导率指整个磁化曲线上磁导率的最大值。

4）纳米晶芯或非晶芯导磁体是用纳米晶、非晶带材料绕制而成的导磁体，需要按图样尺寸定制，槽口内侧一般有绕制的折角圆弧，其产品的主要性能见表 7-13。

表 7-13 纳米晶芯与铁氧体芯基本磁性能对比

基本参数	纳米晶芯	铁氧体芯
饱和磁感应强度 B_s/T	1.25	0.5
剩余磁感应强度 B_r/T	<2.5	0.2
铁损 W/kg（20kHz）	<20	
磁导率 G_s/Oe（20kHz）	>20.000	2000
电阻率/μΩ·cm	130	106
居里点/℃	570	<200
芯的叠片系数	>0.70	

205. 硅钢片作导磁体时，其厚度应如何选用？

原则是电流频率越高，硅钢片厚度应越薄。硅钢片在磁场作用下会产生涡流而发热，称为铁损。硅钢片厚度小于所施加磁场的涡流深度（冷态）则铁损较小。硅钢片厚度 d（mm）一般按 $d = 20/\sqrt{f}$ 计算，f 为电流频率（Hz）。不同电流频率时所需的硅钢片厚度见表 7-14。

表 7-14 不同电流频率时采用的硅钢片厚度

电流频率/kHz	0.05	1.0	2.5	4.0	8.0	10	50	100	200
硅钢片厚度/mm	0.5	0.5	<0.4	<0.3	<0.22	<0.2	<0.08	<0.06	<0.044

实际生产中，由于感应加热时间极短，加热后，导磁体立即受到淬火液的冷却，所以最常用在中频感应器上的厚度是 0.35～0.2mm，超音频感应器可采用

0.08 ~0.15mm，高频感应器可采用 0.05mm。

206. 如何选用导磁体？

导磁体的选用原则如下：

1） 首先考虑的是符合使用频率，如果频率不合适（一般是频率高于规定范围），导磁体会积聚发热，铁氧体导磁体超过居里点会失效；硅钢片过热会氧化甚至发红，超过居里点失效；可加工导磁体，首先是烧坏粘结剂并碎裂。因此，选用的原则最重要的是符合使用频率。

2） 性能与效率。导磁体的性能中最主要的是磁导率，磁导率越高，它的磁感应强度也越大。

3） 电阻率要大。导磁体在交变磁场作用下会产生涡流，电阻率大，涡流损耗就小，硅钢片硅含量高，其电阻率就比硅含量低的纯铁片高。

4） 居里点要高。导磁体在工件热辐射下和自身铁损双重作用下会发热升温，如果居里点低，导磁体升温超过居里点，就很快失效了。

5） 导热性要好。导磁体一般紧贴铜管或铜散热片，可以通过铜管或铜片带走热量，维持略高于铜管中水的温度，如果导热性差，就达不到降温的目的的，会不断升温。

6） 抗热震，耐腐蚀，有良好的力学性能。导磁体装在感应器上处在振动、腐蚀、骤冷骤热的恶劣条件下，因此，必须抗热震，耐腐蚀，有良好的力学性能，才能耐久使用。

7） 加工性好。导磁体要制成各种形状与感应圈相配合，因此要便于加或压制成形。

207. 如何用简单的方法比较导磁体的质量？

导磁体的许多性能参数需要专业的仪器来测定，对使用者来说是不可能的，但是用以下的简单方法可以大致测得导磁体的性能优劣。

1） 对比试验。将同规格不同牌号的导磁体各一块装在同一根线圈上（平面加热方式比较最好），通电后察看所加热钢件哪一块对应的部分先红，先红的质量好。

2） 较长时间加热。断电后测量两块导磁体的温升，温升小的质量优。

3） 居里点的测量。加热到导磁体所标称的居里点温度（例如 180℃），然后用永久磁铁测试其是否失掉磁性。如果吸不动，说明已到达失磁点了，自然居里点高，使用效果应比低的好。

4） 泥糊状或可加工导磁体的使用温度是受粘结剂的耐温性所限，它和居里点是另一个概念，可以在炉子内加热到工作温度看其是否裂碎。

5） 从导磁体的密度值可大致知道其含铁粉情况。因为铁氧体与可加工导磁体的主要成分是铁粉和粘结剂。对可加工导磁体而言，铁粉越细粘结剂越多，使用频

率越高，但密度略低一些，一般密度在 4.8 ~ 6.6g/cm^3。铁氧体导磁体的密度应在 4.7 g/cm^3 左右，一般密度高的导磁体它的饱和磁通密度也高。

208. 可加工导磁体加工时应注意什么?

可加工导磁体是由铁磁粉末、粘结剂经搅拌均匀后压制烘烤而成的，对密度最大的 FLUXTROL A 型导磁体而言，它具有各向异性。当制作成 Π 型导磁体时，应注意最佳取向性的选择，对取向硅钢片制造 Π 形叠片时也有同样问题。此外，硅钢片如果是冲压加工而成的，冲压的毛边必须用工具修平，否则毛边与毛边间会导电。

可加工导磁体可以像机械加工金属零件那样进行车削、钻削、铣削、磨削加工。加工时刀具应锋利，进给量要小，而切削速度要高。机械加工时不需要用切削液进行冷却。由于磁介质材料铁粉外包有绝缘层，因此不适于电火花加工或线切割。

209. 导磁体安装使用时应注意什么?

1）导磁体安装时，最关键的是与有效圈的配合间隙。过去导磁体与有效圈之间采用垫 0.5 ~ 1mm 云母片绝缘的方法，现在已被绝缘胶所取代。它既方便又能更好地为导磁体带走热量。导磁体与有效圈的单边间隙应控制在 0.1 ~ 0.2mm 之间。

2）导磁体如果是跨在两根有电位差的导体上时，可以在中间切开一条缝，以防止匝间短路。

3）为安装方便及节省材料，可加工导磁体可以由几段材料粘接起来使用，粘接后加工或加工后再粘结均可以。

4）硅钢片导磁体常采用纯铜挡片内衬绝缘箔（云母或四氟薄膜）固定，纯铜挡片折弯后可包住硅钢片束一部分，见图 7-64。

5）当硅钢片束叠片总厚度很厚时，为防止受热膨胀而在有效圈上成拱桥形鼓起，应在每 10mm 厚叠片间加插 0.2mm 云母箔片，以缓解此膨胀应力。必须指出，叠片安装时一定要装紧装实，不能松动。

6）对可加工导磁体在有效圈上的固定，可以在导磁体背部钻小孔（配 M3 ~ M6 螺栓，根据导磁体块的大小选定）。此时，有效圈上应焊上相应的螺栓（黄铜制），装上导磁体后拧上螺母固定，见图 7-65。此螺母不应拧得太紧，避免压碎导磁体，用塑料螺母更好。由于感应器在工作时有振动，因此可用粘结剂将螺母粘结到螺柱上，这种做法也称为螺纹锁。

210. 导磁体胶应如何选用?

导磁体胶的主要用途是将导磁体固定到感应线圈上，不易脱落，耐久使用。选用导磁体胶时应注意以下几点：

1）导磁体胶应有优良的导热性。因为导磁体的热要通过粘结剂传导到铜有效圈，由冷却水带走。

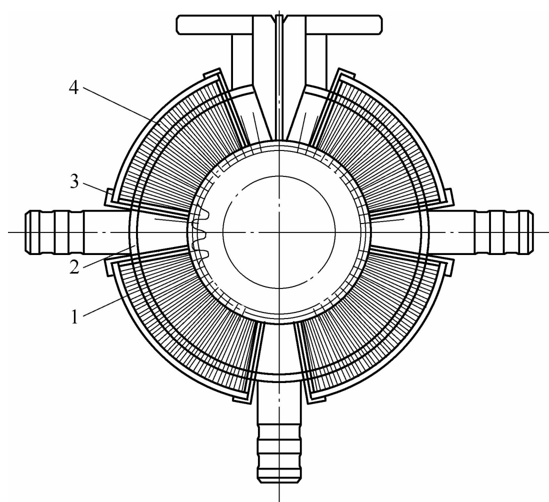


图 7-64　硅钢片的固定

1—硅钢片　2—有效圈　3—挡板

4—云母垫片

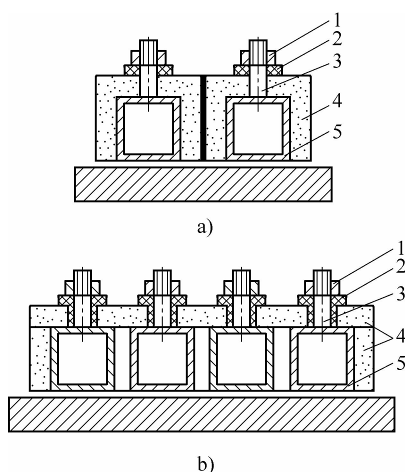


图 7-65　可加工导磁体的固定

a）带状感应器　b）多匝感应器

1—螺母　2—垫圈　3—螺栓

4—导磁体　5—有效圈

2）导磁体胶要有低的热膨胀系数。这点对可加工导磁体至关重要，如果膨胀系数高，会导致可加工导磁体破裂。

3）导磁体胶使用温度应高于 200℃。这是对可加工导磁体来说的，因为粘结剂紧贴铜管，铜管有水冷却，因此 200℃已经足够了；对硅钢片导磁体，因为居里点温度高（700℃），当用在粘结其他表面时，自然用高温胶更好。

4）导磁体胶应有较低的粘度，有高的电阻率，粘度太低，粘结剂会从缝隙中流出。

211. 何谓泥糊状导磁体？如何将其固定到有效圈上？

泥糊状导磁体也称可成形导磁体（formable concentrator），它是由磁介质或铁氧体粉用粘结剂混合涂敷到有效圈上的一种胶状混合物。它有一定的制备工艺，一般应用于不易安装束状或块状导磁体的场合。由于泥糊状导磁体含胶更多，其密度也更低，相应的磁导率也低一些，但使用方便。

将泥糊状导磁体固定到有效圈上的方法如下：

1）铜管用喷砂或钢丝刷除去表面油污、碎粒。

2）将泥糊状导磁体放入容器加热到 55℃，使其具有塑性，成橡皮泥状。

3）准备一个光滑干净的滚压表而，用薄铝板做成模壳并用胶带将内外模壳板固定到有效圈上，以便填入泥糊状导磁体。

4）计算并测量需覆盖面积，将泥糊状导磁体制成条状，厚度为 6.35mm（1/4in），用压棒压在模壳槽中。

5）将每段条状物放置到线圈的模壳中，并用加热机（热吹风机）加热，使泥糊状导磁体粘结到有效圈上，及时用小刀修剪不需要的部分，连接部位用手指捏拢，使之无缝隙。用胶带成螺旋状缠绕条状物并束紧，使泥状导磁体紧贴到有效圈上，并在烘干时保持形状。

6）在烘箱中于 120℃烘烤 1h，再升温到 190℃烘烤 1h。

7）带上手套，趁热用刀解掉胶带，冷却后就不好去掉了。

8）放在平表面上让线圈冷透，并去除铝板制的模壳。

212. 导磁体必须磷化吗？如何防止导磁体腐蚀？

对硅钢片而言，前苏联资料提出磷化可解决导磁体片与片之间的绝缘问题，磷化确有此效果。由于现代产品冷轧取向硅钢片在供应状态时，钢厂已进行表面防锈喷漆处理，已存在绝缘层，因此可以使用此涂层作绝缘用。如果要进行磷化，首先要去除涂层，此工艺常被认为锦上添花。至于可加工导磁体，在机加工后表面粒子的绝缘层被破坏，因此，应对可加工导磁体进行磷化处理，特别是对 FLUXTROL A 型导磁体，其磷化工艺是在 15% 磷酸溶液中于 66℃（150℉）温度下保持 15min，然后取出清洗并吹干即可。

导磁体安装到有效圈后，为防止淬火液的腐蚀，可以在表面涂一层胶进行保护。

213. 导磁体失效现象与原因有哪些？

（1）铁氧体导磁体　高频设备用得最多的是铁氧体导磁体，它脆而易碎裂，因此，不能受冲击与外力，但淬裂块黏合后仍能使用。失效的主要原因是过热，温度超过它的居里点（国产的大都小于 180℃），就失效了，因此，必须注意不使它过热。

（2）硅钢片　它的居里点在 700℃左右，所以使用温度相当高，但它会锈蚀和老化，降低感应器效率。因此，硅钢片导磁体使用一定周期后要更新。德国曲轴感应加热设备上配有一种振荡因数仪，能测出曲轴感应器导磁体老化的相对值。

（3）可加工与泥糊状导磁体　它由还原铁粉与胶粘剂混合压制而成，它的居里点应该与硅钢片相似，但胶粘剂的耐温性却不高。因此，使用时不能超过胶粘剂的使用温度，以美国 FLUXTROL 公司产品为例，使用温度短时不超过 300℃，长时间不超过 250℃。

214. 什么是树脂浇注体感应器？

对于易变形及不便使用间隔螺钉固定的感应器，现在采用树脂类浇注料固定法，使易变形的铜管与树脂浇注成一体。这种感应器不易因振动、外力等原因而变形。图 7-66 所示为一种树脂浇注体感应器。其有效圈内径为 18 mm，同时铸出喷液器的内腔。浇注料是合成树脂加石英涂料，石英涂料使树脂具有较高的耐热性。这种铸模还可以铸出螺纹。由于合成树脂收缩率很小，因此，铸出的螺纹尺寸是精

确的。喷液器盖的螺纹可以通过车削加工制成与其相配装。

215. 什么是耐火水泥浇注体感应器？

对于某些加热温度达 800℃左右工件的感应器，树脂浇注体达不到耐温要求，此时可使用耐火水泥浇注感应器。图 7-67 所示为一种耐火水泥浇注的弹簧钢板加热感应器。弹簧钢板淬火前的温度在 800℃以上，因此，感应器用耐火水泥浇注，底部还有导轨，弹簧钢板是放在导轨上进行加热的，这种感应器的炉膛长度达 1600 ~ 2750 mm。

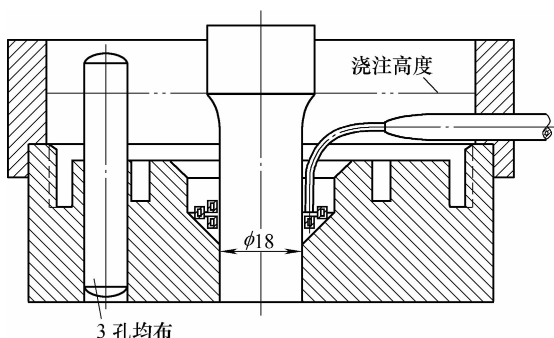


图 7-66　树脂浇注体感应器

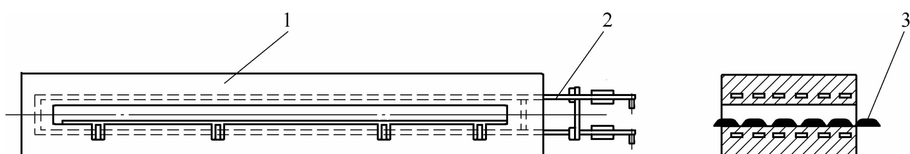


图 7-67　耐火水泥浇注的弹簧钢板加热感应器

1—耐火水泥　2—感应器　3—工件

216. 屏蔽器的材料与厚度应如何确定？

屏蔽器的材料一般采用金属板料或型材。在电磁场中，屏蔽器吸收的功率与其磁导率与电阻有函数关系。铜的磁导率 $\mu = 1$，在相同磁场中，它吸收的功率是低碳钢的 1/50 ~ 1/30，尽管如此，铜屏蔽器仍需水冷。

屏蔽器的厚度应大于该材料电流透入深度的 4 倍。铜的电流透入深度较小，作屏蔽器时板材厚度可较薄。当 $f = 10$kHz 时，厚度可用 2.5mm；当 $f = 450$kHz 时，厚度可用 0.61mm。

217. 什么是感热体？如何应用？

感热体也称感受器（Susceptor），是一种在磁场中能够加热的材料，通过感热体的热传导或辐射来加热它包容的工件。它主要应用于不能直接用于感应加热的工件，如半导体工业中硅、锗、砷化镓和氧化锆等的高温加热，还有一些金属丝因直径太细，直接感应加热电效率太低，也可采用感热体加热。

制作感热体最常用的材料是石墨，但石墨在高温时易氧化，因此，应在真空或保护环境中进行。此外，用康奈合金、铂、钼、钨与不锈钢等材料均能制作感热体。

感热体的三种主要形式见图 7-68。图 7-68a 所示感热体把加热零件与电磁场完全屏蔽了，它靠感热体的辐射热来加热；图 7-68b 所示感热体沿长度方向开有缝

隙，它既有直接来自感应器的能量，也有来自感热体的辐射热；图 7-68c 所示感热体是环形的，通常用于玻璃与玻璃或塑料与塑料间的密封，加热过程中，玻璃或塑料与感热体接触部分会软化，加压后，此封口件即成为一个整体。

218. 如何制造既保证有效圈定位精度又经济的感应器？

有效圈与加热工件的相对位置固定不变是获得淬火件质量一致的重要保证，最常见的相对位置是圆环感应器与加热件的同心度。为保证有效圈与工件的同心度，一般在感应器设计制造上常严格要求感应器的制造精度，如中心高（有效圈中心与接触板间的距离）、垂直度（有效圈底面与接触板垂直度）与偏心距（有效圈中心与淬火变压器中心偏差）等。但是这些要求对用导电管固定到快换夹头的高频感应器并不适用，因为导电管的定位常是前后可动的，即使制造得再精确，调整时仍需手工定位，费时费力。

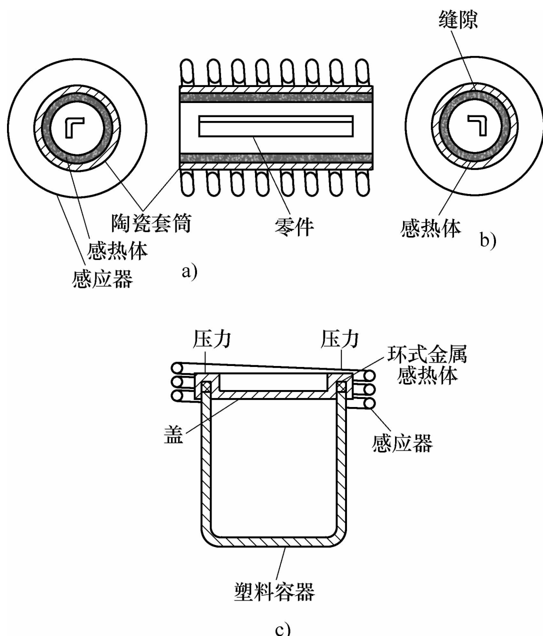


图 7-68　感热体的三种主要形式
a）全屏蔽式　b）缝隙式　c）环形

图 7-69 所示为在有效圈两旁焊上两块耳板，再在淬火机左右两侧固定两块定位销板，板上有定位销孔。新调整的感应器手动调整定心后，将耳板按定位销板上的孔钻上定位销孔，以后再次使用这个感应器时，只要耳板上的定位销孔与定位销板上的孔一致，插入定位销，即完成调整。这样的感应器制造上比较经济，调整方便，定位精确。

219. 制造感应器的工夹具有哪些？感应器的检验工具与夹具有哪些？

制造感应器的通用工具有台虎钳、平板、弯板、木块、橡胶锤等。因为纯铜很软，必须用低于铜硬度的材料去敲打它，才不致产生伤痕。

制造感应器时还需要一些量具，如卡尺、高度尺、塞尺、量棒、角度尺、电工用万能表、流量计、手压泵等，特殊的还使用光学投影仪测量关键尺寸。组装后大量生产用的感应器如轿车曲轴感应器，还有专用检验夹具，检测接触板与轴颈的中心距、垂直度等项目。

通用型检验夹具如图 7-70 所示。

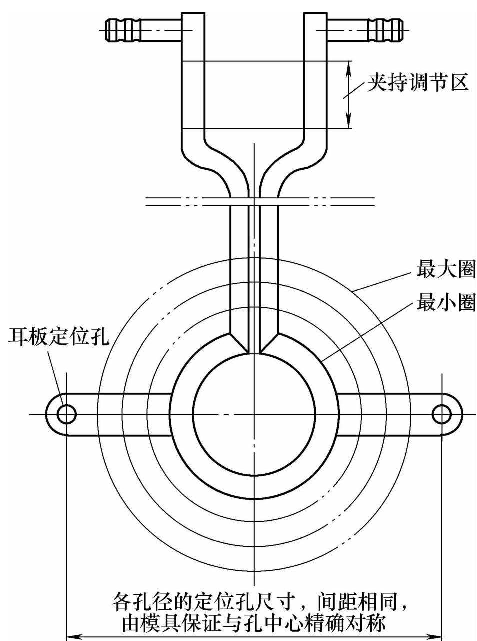


图 7-69　在有效圈两旁焊上两块耳板

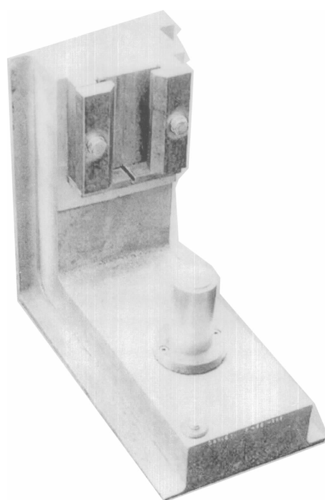


图 7-70　通用型检验夹具

220. 感应器矩形管的成形方法有哪几种？

感应器铜管成形方法主要有以下几种：

（1）拉制　将圆铜管在定型拉模中冷拉成形，这是现在使用最普遍的方法。为拉出较理想的轮廓，有些矩形要通过多次拉制才能完成。拉管模具如图 7-71 所示。

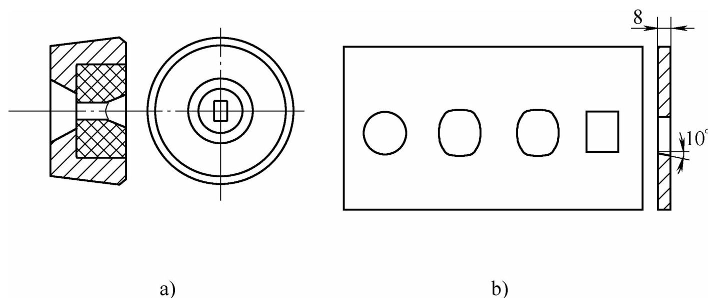


图 7-71　拉管模具

a）圆形拉模　b）多次成形拉模板

（2）轧制　在车床单动卡盘的四个卡爪上各装一个滚轮，变换滚轮的宽度与调整轮子间的距离，可轧制出不同截面尺寸的铜管。

221. 感应器的水流量测试有哪些方法？

感应器能承受一定压力不漏水不代表冷却通道符合要求，这是因为如果有焊渣堵塞通道，试压也是不漏水的。因此，流量检测才能真正显示通道的优劣。通道的

流量一般随压力、截面的增加而增大，随通道长度、转弯数增加而减少。对一般匝数不多的感应器，0.5MPa 压力下，其截面上每 mm^2 流量为 0.4 ~0.5L/min。据此，可以大致得出某一截面管子的流量是否正常。感应器有效圈装配图上一般标有其流量检测要求。

1）流量的检测最常用的是液体流量计，其规格一般上限为 40L/min 即够用了。

2）如果流量特大，也可以用称重法，即在规定的压力下，将感应器出水流入水桶，用秒表记录其 0.5min 或 1min 内流出的水量（质量），即可折算成以 L/min 为单位的流量。

222. 感应器的绝缘测试有什么作用?

现代化的感应器常由几十个零件所组成。它的有效圈是通高频电流的，而其他部分，如定位块、侧板及一些附件（如手把、喷液器、夹紧螺栓）则是不通电的，设计上已有绝缘件作间隔。如果这些零件上通上高频电流即会产生短路等故障。因此，感应器制造后应进行绝缘性检测。根据不同的使用电压、绝缘材料，可使用不同的仪器。当一般接在淬火变压器上使用电压很低（数十 V）的感应器可用万能表检测，使用电压较高的才使用绝缘电阻表。

223. 感应器负载测试有什么作用?

对几何形状复杂的工件，在未有计算机模拟法以前，一般需作负载测试。其目的是调整有效圈各部的加热区间隙或导磁体的布局。负载测试只是将工件加热，不一定到淬火温度，通过工件表面各点氧化色的不同，能大致判断该部的温度与差别，从而对间隙、区域尺寸及导磁体布局进行修改。

224. 感应器的密封试验有哪些方法?

感应器的密封试验是一个重要的检测手段，因为感应器一般通水冷却，常有许多焊口，如果通水时焊口漏水，就不允许通电工作。

1）一般密封试验采用手压泵进行，测试时将感应器一段接到手压泵接头，另一端在排净空气后堵住，手压泵动作后，泵的压力表会显示所达到的压力值，关闭阀门保持 5min，如果表上显示数值稳定不变，说明感应器无溢漏，如果表上数值下降，说明有泄漏。小溢漏常常是渗漏，肉眼不易察觉，必须用干布擦干可疑点，然后观察。

2）另一种测试法是将感应器一段封堵后放入水槽中，然后通入压缩空气或氧气（也可调整压力大小），发现水槽中有气泡上升，就能查到泄漏点。密封试验的测试值一般为实际使用压力的 1.5 倍。

225. 感应器合理使用与维护的要点有哪些?

感应器是一种精密工装，价格高，技术含量多，因此，要细心使用与认真维护。

1）多个感应器在一个使用点使用时，要有感应器贮存架并有编号。

2）感应器使用前，要用细纱布擦干净接触面，安装时要轻拿轻放，防止磕碰和变形。

3）安装感应器时，必须拧紧压紧螺栓或偏心夹头等夹紧机构，定位块固定螺钉等也要经常检查，不能松动。

4）水路连接是关键，不接错，不遗漏，确认通水后才允许通电。

5）有效圈与工件间隙，根据不同感应器要求要定期检查，变形的有效圈要调整后再使用。

6）发现导磁体位置变动或其他附件松动等，要进行调整后再使用。

7）感应器使用后，要擦净铁屑及油污才能放回存储架。曲轴感应器导磁体上有时因油污与铁屑结合成硬壳，会引起短路，必须注意。

226. 如何提高导磁体的使用寿命？

导磁体损坏主要的原因是过热。因此，要提高导磁体的寿命，除避免机械外力、腐蚀与电短路损坏外，如何使导磁体不过热是提高导磁体寿命的关键。

1）对硅钢片而言，叠片的厚度必须正确选择。

2）对可加工导磁体而言，不同牌号具有不同的频率范围与相应的绝缘性，必须正确选择牌号。

3）导磁体与铜管的贴合间隙是导磁体降温的关键，此点常为众多使用者所忽略，因为上世纪的设计资料曾规定在硅钢片与铜管间放入 1mm 厚的云母片作绝缘层，因此，硅钢片与铜管导热作用较小。后来西方国家采用薄的胶粘层作绝缘层，其厚度常小于 0.3mm，因此导磁体上的热可以很快地被铜管带走，使导磁体不致过热。据此，导磁体与铜管间的间隙与胶粘剂的性能（热导率，膨胀系数，粘度等）亦受到重视，此间隙值最好控制在 0.1 ~ 0.2mm，胶粘剂则推荐使用 EPOXY50-3100 配 105 固化剂，耐温可达 205℃，其粘度、热导率和耐温性均较优良。导磁体必须与铜管贴合紧密无空隙。

4）采用外部冷却。如硅钢片中间夹入散热铜片，可加工导磁体兼作喷液器等，还可以在不影响加热件温度情况下，对导磁体滴水散热等。

5）阻止导磁体腐蚀。目前较简便的方法是对硅钢片束上涂一层环氧树脂或其他胶粘剂作保护膜，可加工导磁体经切削加工后，进行一次磷化处理有助于提高其表面绝缘性能，铁氧体导磁体不需另涂保护膜。

227. 感应器失效的形式有哪些？

（1）有效圈烧伤或烧断　其原因是：

1）有效圈未通水。例如：冷却水泵突然停转而感应器继续通电；调试感应加热工艺时，未通冷却水等。

2）接错进出冷却水管。对多匝内孔加热感应器，进水必须接在中心返回的导

电管上。

3）感应器承受过大功率。例如：有一种半轴扫描感应器，正常工艺 50kW 即能淬出合格产品，某厂为提高产量，将功率升到 150kW 以上，又没有采取提高水流量等措施，导致有效圈烧断。

4）感应器长期使用硬水，因水垢减少流量而导致烧断，常见于高频感应器。

5）对载流密度特大（如 1200A/mm^2 以上）的有效圈必须采用高压水（0.6～1.0MPa 或更高)，而且软水中不能溶入空气，气泡会使铜管局部温升过高而烧熔或氧化。闭路循环、并使感应器回水管接在水槽液面下是防止冷却水进入空气的必要措施。

（2）接触面烧伤　感应器接触板与淬火变压器二次绕组接触板之间，感应器接触板与快换夹头之间，工作中有很大的电流通过，因此对这个接触面有三个要求：①接触面干净；②贴合面积尽可能大于 60%；③有一定压力，即压紧，压紧螺栓在工作中会发热松扣，一定要定时检查并重新拧紧，此点极为重要。否则，随着使用时间延长，接触面会氧化，导致接触电阻增大—发热—氧化更厉害的恶性循环，最终产生接触面打火并烧伤。曲轴感应器的 V 型接触面如果偏接触或压得不紧，此接触面就会烧伤，接触不好，甚至会影响感应器功率，此点必须注意。

（3）有效圈铜材热疲劳开裂　载流密度大的有效圈，在通电瞬间，铜材升到几百度的高温，断电时立刻冷却到水温，铜材局部不断地热胀与冷缩，经过几万次以上的循环，会产生热疲劳甚至出现起泡与开裂等现象。曲轴有效圈就是一个典型的例子，在有效圈镶导磁体的中间部分，截流密度最大，容易起泡，将这段导磁体左右分割成两部分，中间留有间隙，中间即不易起鼓泡。

（4）有效圈与工件相碰而烧伤　这与间隙大小或工件弯曲变形等有关，现在除喷涂陶瓷等措施可解决此类问题，另一种经验是工件与机床间衬以绝缘套筒，使工件不接地。

（5）其他原因　还有电气、机械设备失灵，软管脱落，接管时胶布掉入进水管等。

228. 如何提高感应器的使用寿命？

1）在感应器设计时，采用无氧铜制作，结构上注意保证足够的刚性。

2）电接触面的维护。感应器与变压器的连接面是导电接触面，此面必须清洁，可用软的百洁布清擦干净，然后镀银。

3）螺栓压接设计需用特殊螺栓及垫圈。感应器接触板压贴到淬火变压器的二次绕组输出端，常用螺栓与垫圈拧压，应注意以下几点：

①　变压器输出端的螺栓孔必须加装不锈钢的钢丝螺套或黄铜的螺纹衬套。因为纯铜硬度低，经不起不锈钢或黄铜螺栓多次拧动，会因螺纹滑扣而失效，使输出

端损坏，螺栓拧入螺套深度不少于 10mm（以 M8 螺纹为例，其余类推）。

② 此螺纹孔必须攻透，否则螺栓看似已经拧不动，实际上螺栓并未将感应器压紧到变压器输出端。此螺栓拧入长度应小于螺孔深度，螺栓预紧力应在 155 ~ 178N，预紧力过大会损坏螺套（以 M8 螺纹为例，其余按规定值）。

③ 垫圈应是特制的加大、加厚的垫圈，它能有效地将局部压贴紧。

4）感应器贴合面中间应设计成凹槽，使导电面压强增大。此表面尽可能镀银，既可防止氧化，又能减少接触电阻。绝缘板两侧的导电板倒角，可防止感应器安装不正时产生变压器侧的短路。

229. 感应器使用寿命如何计算？

随着技术进步与感应器制造价格的提高，感应器作为一种工具消耗，其成本考核亦越来越受到重视。感应器的使用寿命从近百次到几十万次的都有。轧辊感应器、滚道扫描淬火感应器因每次负载时间较长，其寿命较短；而 CVJ 零件的淬火感应器每次负载时间较短，其寿命就较长，达几十万次。

为了检测感应器的使用寿命，现在已有一种独立式感应器周期计算器供应市场，如图 7-72 所示。它安装在感应器上面，每通电一次，它能累积计数并存储数据，显示感应器使用寿命，如 5 万次或 20 万次等。



图 7-72　安装在感应器上的感应器周期计算器

230. 如何提高感应器效率？

1）加强感应器与工件间的耦合，简而言之，是减小有效圈与加热表面间的间隙，特别是内孔与平面感应器，间隙大小对效率影响很大。

2）减少导电板或返回支路的长度而增大该部分的宽度（导电截面），以减少电阻损耗。

3）有效圈上镶装导磁体，减少杂散磁场，这不但适用于内孔、平面加热感应器，也能用于外圆加热感应器，如齿轮外圆加热感应器。

4）多匝感应器在匹配合适条件下，常比单匝感应器效率为高。

5）除减少电阻损耗外，也要考虑感应器上的电感损耗。两块导电板之间的间隙不宜大，而应在 1 ~ 2mm 之间。串联的几个有效圈要布置恰当，以减少电感。串

联感应器的正确布置如图 7-73 所示。

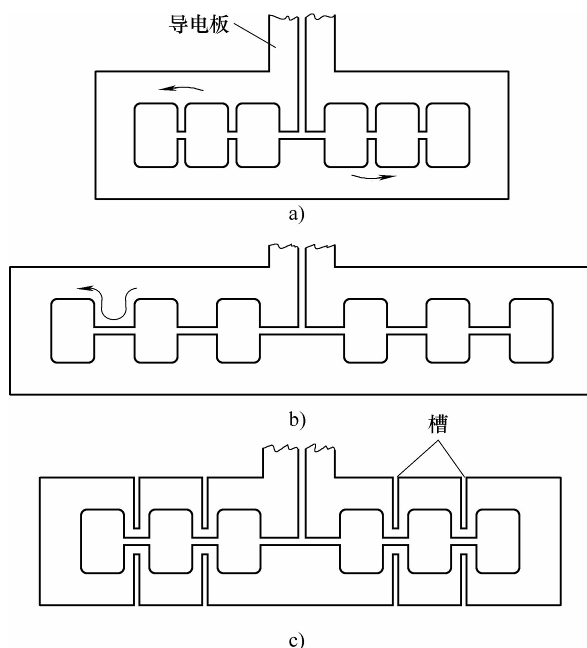


图 7-73　串联感应器的正确布置

a）错误　b）较好　c）最好

231. 感应器的电感与哪些因素有关？

感应器的电感是可以用高精度的电感表测量的，但对单匝而直径小的淬火感应器来说，其值很小，常在 1μH 以下。曾经测试过，感应器上镶装导磁体后，电感增大。有效圈直径越大，宽度越小，电感越大；反之越小。导电板间间距越大，电感也越大。

232. 感应器有效圈载流密度的上限是多少？

据早期资料介绍，感应器有效圈在通水冷却条件下，载流密度的上限为 150A/mm^2。近年来，由于高压水的应用、限制水中含空气量，以及提高水的冷却能力的循环系统配套设施的完善，有效圈的载流密度上限已提高到 1200 A/mm^2。

233. 感应器常用金属材料有哪些？应如何选用？

感应器最主要的用材是纯铜，以无氧铜为首选，因为它的导电性最好。铜的供应状态有软态和硬态之分。硬态或铜加工硬化后，铜的硬度、强度增加了，但电阻率亦增大（纯铜软态时电阻率为 0.01724μΩ · m，硬态时增大为 0.01777μΩ · m）。

1）感应器用纯铜有棒材、板材与管材等品种。一般棒材用以车制感应器的导电头（也有用锻件加工的）和精度高的有效圈，特别是加热和喷液一体的组合式感应器。板材常用于制作接触板和导电板、侧板等。管材有圆管与矩形管等品种。

2）黄铜是感应器上的主要用材之一，主要用于制作螺栓等紧固件。黄铜力学性能好，感应器附件、喷液器也常采用黄铜制作。常用牌号为H62、H68。

3）非磁性钢（无磁性的不锈钢或奥氏体钢）是有效圈附件常用材料，由于其抗拉强度与耐热性比黄铜高，且价格不贵，重要附件常首选此材料。

4）硅钢片可用于制作导磁体或屏蔽件。

5）铝合金用以制喷水盒，常用牌号有2A12等。

234. 感应器常用绝缘材料有哪些？应如何选用？

感应器常用绝缘材料及其选用见表7-15。

表7-15　感应器常用绝缘材料及其选用

名　称	使用温度/℃	优点与缺点	用　途
聚四氟乙烯PTFE（棒、板、薄膜）	≤250℃	耐热性高，绝缘，刚性差，不耐磨	绝缘垫片、衬套、垫圈等，替代云母垫片
尼龙PA6、66、1010	150	耐热性较低，绝缘，成形工艺性好，耐磨性好	衬套、螺栓、螺母、喷液圈等
玻璃纤维丝套管	400	绝缘，耐热性高	用于制作绝缘套管，亦可套在导电管上作绝缘件
高硅氧玻璃纤维布	800	耐温，但不耐磨，松散易脱落	有效圈上的耐热防护材料
特种高硅氧玻璃纤维布［$w(SiO_2)>90\%$］	软化温度1491	耐高温，但不耐磨，力学性能差	配上特种液体包覆在感应器上
有机硅玻璃云母带5450		绝缘，耐热	硅钢片间作衬垫
无碱玻璃纤维带	400		包装导电管等
玻璃纤维板、棒	200	绝缘耐温，耐化学腐蚀	喷液管、绝缘套等
聚醚醚酮（PEEK）	260，短时300	耐高温力学性能好，绝缘，抗水解	喷液部分
聚苯并米唑（PM）	310，短时500		
聚酰亚胺（VESPEL）	−270～300	耐磨损，绝缘，抗辐射	附件
酚醛层压布板3025（板、棒、管）	<125	机械强度高	感应器上加固件、支撑件等
环氧酚醛布板3240（板、棒、管）		力学性能、电气性能、耐水性能更好，耐热	感应器上加固件、底座等
高频电炉板		可加工，绝缘	感应器底座用
可加工陶瓷	800	高强度电气绝缘，可加工，耐磨性差	感应器上支撑件
致密型熔铸云母	1000	耐高温，绝缘，可加工，耐腐蚀，抗热震	感应器内衬、高频螺栓、支撑件
单体浇铸尼龙MC尼龙	<120	力学强度、刚性优于尼龙6、66	浇铸大型底座及弯板等固定件
硬聚氯乙烯板PVC板	<60	力学强度高，使用温度低，可加工性差	底座等
聚酯	−60～120		

235. 感应器钎焊用的焊料与焊剂有哪些？如何选用？

感应器上用的本体、喷液器等金属件绝大部分为纯铜、黄铜，还有不锈钢与硬质合金。焊料主要为铜焊料、黄铜焊料、银铜焊料与锡焊料，前三种焊料钎焊温度高于 500℃，称为硬钎焊（或铜焊），后面一种称为软钎焊（或锡焊）。感应器硬钎焊用焊材成分、熔点与应用见表 7-16，感应器软钎焊用焊材成分、熔点与应用见表 7-17。

表 7-16　感应器硬钎焊用焊材成分、熔点与应用

名称及牌号	主要化学成分（质量分数,%）					熔点/℃	应用金属
	Ag	Cu	Zn	Cd	其余		
银焊丝 LAg8	7~9	55	36~38			860	Fe、Cu
银焊丝 LAg12	11~13	52	35~37			830	Fe、Cu
银焊丝 LAg15	14~16	49	23~29	8~12		770	Fe、Cu
银焊丝 LAg20	19~21	32	23~25	13~17		750	Fe、Cu
银焊丝 LAg25	24~26	43	19~25			780	Fe、Cu
银焊丝 LAg44	43~45	32	23~25			730	Fe、Cu
铜焊丝 SCu	98				Ag+Mn+Ni=2	1070	Cu
黄铜焊丝	41~43		56~59			845	Ni、Cu

表 7-17　感应器软钎焊用焊材成分、熔点与应用

名称及牌号	主要化学成分（质量分数,%）					熔点/℃	应用金属
	Sn	Sb	Fe	Cu+As+Ni	Pb		
锡焊丝 LPb98.5					98.5	320	Cu 及其合金
锡焊丝 LSn40	40	2.7	0.08	0.16	其余	223	Cu 及其合金
锡焊丝 LSn50	50	3.3	0.09	0.18	其余	200	Cu 及其合金
锡焊丝 LSn60	60	3.2	0.10	0.20	其余	185	

一般根据钎焊部位选用焊料。导电部分的接头最好用银焊，因为银焊料的电导率（IACS）较高，如 w（Ag）=72%，w（Cu）=28% 的焊料，电导率达到 87%。另一因素考虑的是焊料的液相点，如 w（Ag）=45%、w（Cu）=15%、w（Zn）=16%、w（Cd）=14% 的焊料则具有较低的液相点 620℃。对要求钎焊部位钎焊温度较低时，常选用这种焊料。另外，非导电部位如水盒、喷液器等可采用黄铜焊；有效圈铜管间连接则常采用低银焊条，如 w（Ag）=15% 的焊条，它具有稍高的液相点（>800℃）与较低的价格。纯铜焊丝常用于管子局部的焊接，先点焊上，然后用低银焊丝进行整个焊缝的焊连。锡焊属软钎焊，它的熔点低，常用于散热铜管与铜板的连接，这些部件没有电流直接通过，只是通过铜管的水带走所焊铜板上的热而已，中频变压器的散热板与曲轴感应器的黄铜侧板常用锡焊工艺于散热

管与板的连接。

236. 感应器零件用钎焊连接时应注意什么?

感应器导电零件一般是由纯铜的板、管或加工件所组成。这些零件钎焊连接的要求如下:

1) 连接处有较好的力学性能。

2) 通水部分一般要求密封性。钎焊过程中,不得减少通水截面积,即不能在焊缝内面产生焊溢。

3) 钎焊表面要洁净美观。

钎焊的实质是将焊料充填到两个金属母材之间起连接作用,母材是不熔化的,而焊料是熔化的。因此,焊料的熔点必须低于母材的熔点。焊剂的作用是防止氧化、减少液体表面张力,增大湿润性与流动性,钎焊过程中,焊剂与氧化铜结合成流动性好的熔渣,浮于熔池表面。焊剂主要由焙烧过的硼砂($Na_2B_4O_7$)和硼酸(H_3BO_3)等组成。

钎焊的焊缝有两种形式,第一种是有毛细管作用的焊缝,是最佳的形式,此时两焊接面的间隙必须保持在 0.1 ~ 0.2mm 之间,才能有较强的毛细管作用,使焊液渗透到较深的缝隙。此时,焊缝具有较高的强度,与焊件母材强度相近。

钎焊的第二种形式是用焊料充填焊缝,此时焊缝很厚,达到 1mm 以上,这种焊缝处的强度亦即是焊料的强度。焊缝厚容易产生疏松、气孔等缺陷。

237. 感应器用的标准件(外购)有哪些品种和规格?

感应器用标准件在逐年增加中,大致分为:

1) 紧固件,如螺栓、螺母、垫圈等,材质有不锈钢(非磁性)、黄铜、聚甲醛等。近年来又增加了钢丝螺套(Helical Insert),用以防止螺孔产生滑扣,螺栓、螺母这些紧固件常用规格以 M3 ~ M16 为主。

2) 管件以黄铜制的弯头、接套等连接件为主。在现代感应器上已大量应用管件,特别是快换管接头的应用,为感应器的快速更换,提供了有力的保证。这些管件的通径常在 $\phi4 \sim \phi25$mm,螺纹连接处的规格则以英制管螺纹为标称,常用规格为 G1/4、G3/8、G1/2、G3/4 与 G1。

238. 用实心铜块加工制作感应器有什么优缺点?

早在 20 世纪 50 年代,前苏联、美国就开始用实心铜块制作感应器,其本体完全用机械加工制作,只有一些水腔盖板等用薄铜板加工后再钎焊上去,典型的例子是分合式曲轴感应器等。这种感应器加工费时,用料很多,是制造厂的复杂工序产品。用实心铜块加工制作感应器的优缺点如下:

1) 用实心铜块制作感应器,使设计者有更大的设计自由度,不受用料规格的限制。

2) 实心铜块机加工的感应器加工精度高,没有手工弯制等自由尺寸,产品的

一致性特别好，左右工位、两套感应器调整出的工艺，产品质量差异极小，老感应器用旧了，新感应器换上去基本无差异。

3）实心铜块加工的感应器一般在设计上其有效圈电路回路上无焊口。因此，没有焊口开裂的危险，使用寿命长，如半轴扫描淬火感应器等。所谓机加组合感应器（简称 MIQ 感应器）就是用实铜块制作而成，水腔盖板是钎焊贴上去的，但该部分并不经过涡流。

4）这种感应器的喷液孔特别难设计，加工也不易。

5）用实心铜块设计制作的感应器一般是又厚又重。它的刚性好，工作中一般不会有高的温升，因此使用中变形小，能长久保持几何尺寸的稳定性。

实心铜块制造感应器仍在继续生产，尽管它的制造成本是很高昂的。

239. 怎样保证感应器的质量与产品的一致性?

（1）保证感应器的质量　保证感应器的质量最关键的是设计，如果设计的图样在施工时不能保证制造质量，这就是设计的缺陷。设计包括：

1）材料的正确选择，如有效圈要用无氧纯铜（OFHC），绝缘件要选耐压、耐温材料，附件要用非磁性钢、黄铜硬质合金等。

2）要有针对性的尺寸公差与制造精度，既不过高要求，也不能全部自由公差。例如：有效圈内（外）径，一般应标注公差。V 形导电面应注角度公差和相应级的表面粗糙度。中心距应有公差。有效圈端面与接触板平面应垂直或平行，喷液孔间隔必须均布及喷射角度要求（与垂直线夹角，圆周上的孔向心汇集）等。

3）钎焊要求，焊缝最好的是由毛细管作用形成的焊缝，其连接强度最好，对焊料的使用应考虑纯铜熔点最高，黄铜次之，银焊料随银含量的增高而降低熔点，导电部分用银焊最好，其他部分用黄铜即可。纯铜焊料常用于局部焊点，先作固定点用，还有锡焊也能使用于散热水管等部分，可根据实际需要选择，焊接点应尽可能少，特别是在导电部位。

（2）模具、夹具与检验夹具的必要性　现代企业管理要求减少待机时间，如果每换一次备用感应器就需重新调整一次工艺，这是不允许的。因此，备品感应器必须与原来替换的感应器性能完全一样，不但外形、重要的是主要尺寸等均须完全一致。还有一种情况是一台淬火机床上多工位工作。例如，左、右两个工位同时淬两个同样的工件，如果感应器有效圈尺寸不一致或喷液器角度、流量不一致，左、右两工位淬火后的工件，质量即会不一致，为保证感应器的一致性，必须有制造模具，焊接夹具与检具等，这样才能保证产品的一致性。

1）模具：如回线形曲轴有效圈必须有模具，以保证有效圈的半径与包角角度、开档宽度等。

2）焊接夹具：保证有效圈的中心高及相关焊件的几何尺寸。

3）弯管夹具：保证各种连接管弯曲时的半径。

4）检验夹具：检测感应器底面与有效圈的中心高、垂直度、偏心差等，快换管接头则必须用管接头母套来检验是否能自由套入或退出，松紧是否适度。

5）密封性检测器具：流量检测仪与绝缘检测更是必要的检具，不可缺少。有些制造厂甚至用光学投影仪测量有效圈关键尺寸。

240. 外圆与内孔同时加热的感应器是什么样的？

碰到一种工件既要求外圆表面淬火又要求内孔表面淬火，通常的方法是先淬外圆再淬内孔，此时外圆用喷水保护，防止回火。这种方法操作比较麻烦，既要换感应器，又要分两次装卸，费时费力，并影响生产率。

美国一感应加热公司研制出一种内孔与外圆同时加热淬火的工艺。工件是行星齿圈，将工件装好后，在通用淬火机上上升，同时进入外圆与内孔感应器的加热位置，两个感应器分别接到两台淬火变压器上，如图7-74所示。

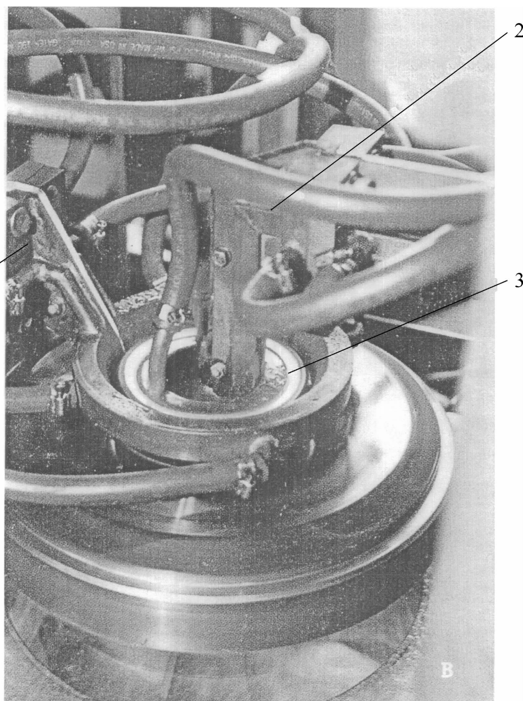


图7-74　外圆与内孔同时加热的感应器

1—外圆加热感应器　2—内孔加热感应器　3—工件

采用10kHz、200kW电源，它同时供给两台淬火变压器。这种设计的难点是外圆与内孔感应器上的功率分配必须恰当，可通过感应器的不同匝数与导磁体来得到满意匹配。上述工件的壁厚只有12.7mm，根据这一设计，对厚壁的销套零件也可采用内、外圆同时扫描淬火。

241. 感应器用柔性电缆是什么样的？

感应器头或有效圈与接座之间，一般用刚性的导电板连接，但有时要求有效圈能活动，此时，就要求有柔性的电缆或母排作导电板。图7-75所示为一种高频感应器用柔性的通水软电缆。软铜线用钎焊或冷轧连接到铜管接头上，外边再套上软胶管，管内有流动水冷却铜软线即可。

242. 钢丝螺套在感应器上是怎样应用的？

现代感应器的结构日趋复杂，例如铜导电条与导电板之间，常用可拆卸的螺栓连接，由于纯铜硬度较低，当用不锈钢或黄铜螺栓连接时，纯铜板上的螺纹会很快

磨损，导致螺栓滑扣。现在解决此一问题的方法是在铜板上镶装不锈钢制的钢丝螺套。钢丝螺套形似一个螺旋弹簧，它的内径是标准的内螺纹，外径则是一种特殊规格的外螺纹，需要特殊的丝锥在母体上攻螺纹，然后用专用工具拧上去。钢丝螺套除不同螺纹规格外，也有不同长度供选用。钢丝螺套拧上母体后，由于弹性作用，自然固定到母体上，拆卸它需要专用工具，如图 7-76 所示。这大大提高了连接处的力学性能，现代感应器上，均已采用此种结构。

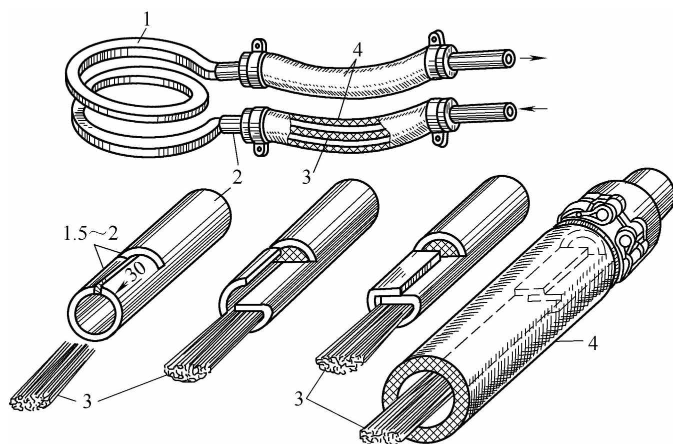


图 7-75　高频感应器用柔性的通水电缆

1—有效圈　2—接头　3—软铜线　4—橡胶管

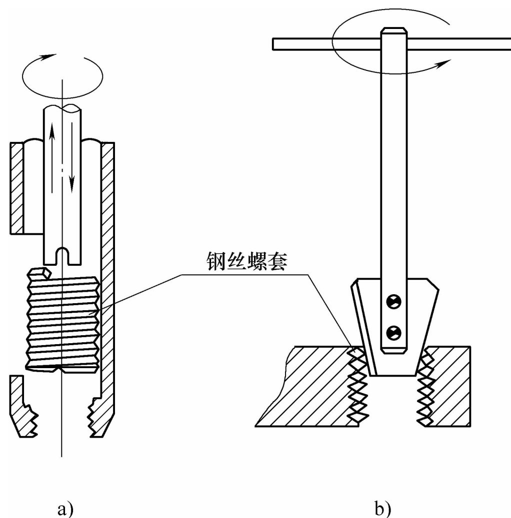


图 7-76　钢丝螺套及其卸装工具

a）拧入钢丝螺套　b）拆卸钢丝螺套

第 8 章　感应淬火机床的结构与性能

243. 感应淬机床有哪几种类型？其主要技术参数有哪些？

感应淬火机床按所配电源设备区分，可分为高频淬火机床和中频淬火机床；按机床功能区分，可分为通用淬火机床和专用淬火机床。

最早的淬火机床是由金属切削机床改制而成的，淬火机床和金属切削机床所不同处有三点，即没有切削金属所产生的负载，有电磁场，有淬火冷却介质和电器以及感应器等的冷却水要求。

感应淬火机床主要技术参数如表 8-1 所示。

表 8-1　感应淬火机床主要参数说明

项　　目	要求与意义
最大加热直径	指加工件可淬火的最大直径，也包括非淬火部分最大直径
最大加热长度	指能处理工件的加热区长度，此值一般小于工件行程值
最大夹持长度	指能夹持工件的最大长度，对全长淬火工件，此值不同于加热区长度
最大零件重量	加热工件允许的最大重量
零件工进速度	指工作行程速度，这是与工艺有关的参数，一般在 4 ~ 30mm/s
零件快降速度	加热后工件快降到喷液器，可以减少预冷时间，此值在 150mm/s 以内
最大返回速度	是返回到装卸工件原点的行程，越快越节省机动时间
零件频动速度	是从一个加热区进入另一加热区的移动速度、越快越节省机动时间
零件旋转速度	指工件每分钟回转速度，目前常规转速为 0 ~ 300r/min
电动机功率	应包括升降用电动机与旋转用电动机
传动结构	全机械式、液压式或二者均有等
冷却方式	一般指浸液淬火或喷液淬火，流量数据是关键数据
主要用途	指功能，一般应指扫描、同时加热、分段同时等
主机轮廓尺寸（长 × 宽 × 高）	供工艺平面布置设计参考用，机床顶尖中心与淬火变压器距离是重要尺寸
控制柜（长 × 宽 × 高）	供工艺平面布置设计参考用，与操作者距离是重要尺寸
主机重量	安装运输用数据
控制柜重量	安装运输用数据
机床底面与地面距离	为保证操作合理，机床底座一般高于地面（但也有低于地面的），便于排水等

244. 淬火机床的主要组成部分有哪些?

(1) 通用淬火机床　一般由机械系统与动力系统两部分所组成。高频淬火机床与中频淬火机床在机械系统上，没有什么差别。但在动力系统上两者不相同，中频淬火机床包括中频变压器、电容器柜。

1) 机械系统。主要包括淬火零件的定位机构、托架升降传动机构、淬火零件转动机构及床身等，如图 8-1 所示。

2) 动力系统。主要包括电气部分、水路部分、气动部分与监控仪表等。

①　电气部分：高频淬火机床的电气部分，主要是淬火机床本身的控制电路及电器，并且备有与高频电源设备相连部分的接线板与控制按钮等；对中频淬火机床，除机床控制电路、电器外，它还包括中频变压器、中频电容器、中频接触器等。

②　水路部分：分淬火水部分与冷却水部分。

a) 淬火水部分：其压力水管路如图 8-2 所示。淬火水自水泵经球形阀→电磁阀→调节阀→配水器→感应器或喷水圈。在配水器上接有水压表，这个表只在电磁水阀接通时才指示，调节阀按工艺需要可随时进行水压的调整。附接在配水器上的水压表一般满刻度为 0.6MPa，已足够了。近年来，有些通用淬火机床上装了流量计来控制喷水量，其控制精度比用压力表指示更高。

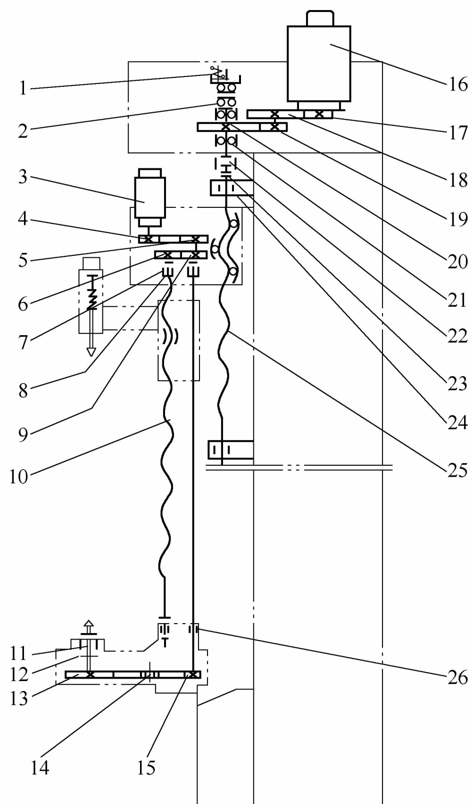


图 8-1　通用淬火机床传动系统图

1—电磁制动器　2—单向推力球轴承　3—微型电动机　4、5、13、15—带轮　6—滑动齿轮　7、11、14、24、26—无油润滑套　8、12、23—无油润滑板　9、17～20—齿轮　10—丝杠　16—交流异步电动机　21—单列向心球轴承　22—联轴器　25—滚珠丝杠

b) 冷却水部分：其压力水管路见图 8-3。冷却水自水泵经球形阀→配水器→支管调节阀→受冷部件。冷却水部分一般还配有水压继电器，用作机床保护。冷却水回水过去设计上均采用排水漏斗，见图 8-4。从排水漏斗外玻璃门上，操作者可监视排水及水流量情况。近年来，由于监控仪器的发展，多数淬火机床上已采用了密

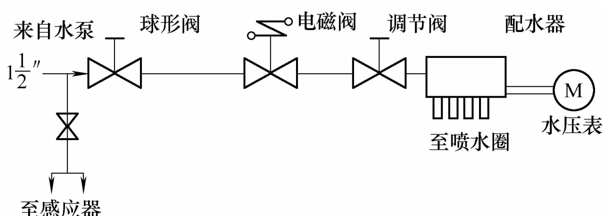


图 8-2　压力水管路示意图

闭回水，即各受冷部件上的回水排到密闭的总管里，直接回到循环水箱去。这样的设计是因为排出水外露时，与空气接触可以使水中含有空气。含有空气的水在通过小截面的有效圈时，会产生气泡，使该部分冷却不良，甚至产生过热、烧熔。

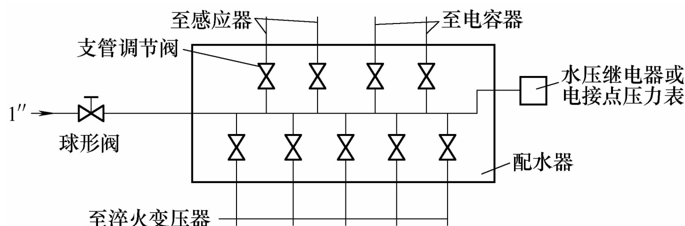


图 8-3　冷却水部分示意图

冷却水中含有空气，排除的办法是将水快速加热到 75℃，另一种办法是将冷却水经较长时期的静置。图 8-5 所示为密闭回水管路系统，此系统可保证循环水中不再溶入空气。

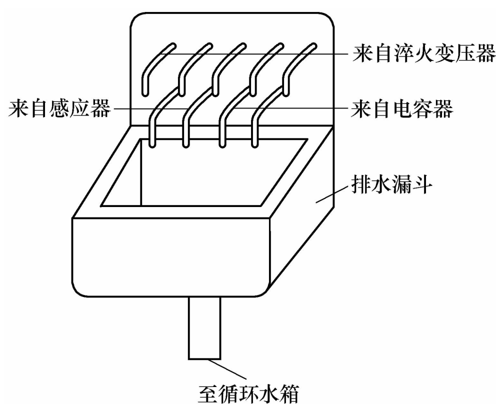


图 8-4　回水管路示意图

③　气动部分：淬火机床的气动部分，一般有如下两种结构。

a）推力气缸：通过手动阀或电磁阀，操纵一个或多个气缸，利用活塞的推力以夹紧零件，夹紧开合式感应器或操纵定位插销使托架快速下降等。

b）气液压缸：利用压缩空气压油，油再推动油缸中的活塞，这样活塞杆的动作会更加平稳。气液压缸主要用在要求动作平稳而无严格进给速度要求的机构上。

④　监控仪表：通用淬火机床上的监控仪表，除显示中频电压、功率的仪表外，还有显示水压的压力表，显示流量的流量表及显示托架移动的速度表等。这些监控仪表能保证工艺参数的正确执行。采用数控淬火机床更可在显示屏上观察工艺参数。

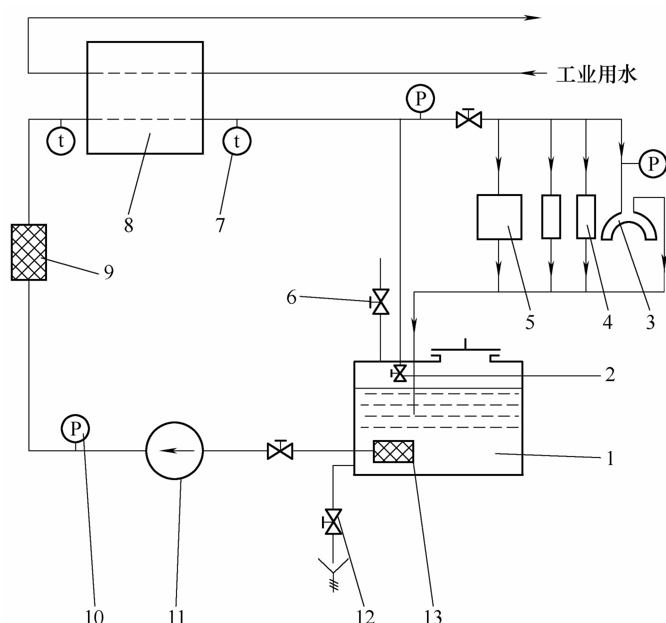


图 8-5　密闭回水管路系统

1—冷却水箱　2—旁路阀　3—感应器　4—电容器　5—变压器　6—加水阀　7—指示式温度计　8—逆流列管式热交换器　9—滤清器　10—压力表　11—水泵　12—排水阀　13—滤器

（2）专用淬火机床　其组成部分与通用淬火机床相同，但机械系统中增加了零件进出料机构及各种专用的定位机构。

245. 淬火机床中常用的机械、电气部件有哪些？

（1）步进电机及其驱动系统　步进电机靠控制系统发出的脉冲信号经过驱动放大来实现步进电机的旋转。这种系统价格低廉，使用简单方便，目前在淬火机床上使用非常广泛。其缺点是驱动力矩一般不大，启动旋转力矩大。

（2）伺服电机及其驱动系统　伺服系统是一种技术水平相对较高的驱动系统，在淬火机床上通常使用计算机控制下的交流伺服。伺服系统具有驱动力矩大、启动性能好的优点，但价格较高。

（3）直线移动导轨　直线移动导轨是一种机械传动效率高、移动速度快、运动直线性好的传动单元，多在一些小型通用淬火机床或淬火变压器移动的淬火机床上使用。

（4）同步齿形带　同步齿形带可以实现两轴之间的定传动比传动，结构简单，重量小，通常用于淬火机床下顶尖（或主轴）旋转系统或升降电机到升降丝杠之间的运动传递。

（5）谐波减速机　谐波减速机为同轴式结构，减速比大，单级传动比可达 50

~350，机械间隙小，传动精度高，多用于淬火机床的分度传动。

（6）变速轴承　这是一种非常新颖的运动传递单元，它除起支承作用外，实际上是一种结构紧凑巧妙的减速器，单级传动比可达到 8~60。

（7）滚珠丝杠　由于滚珠丝杠极其轻便灵活，所以应用在立式通用淬火机床上时必须有防止自行下降的防滑装置，如防滑器、失电制动器或带失电制动的电动机等。

（8）感应器快换夹头与快换水管接头　由于通用淬火机床的加工工件经常变换，更换感应器频繁，使用感应器快换夹头可以快速实现感应器电路和冷却水路一次接通。使用快换水管接头可以改变以往更换感应器时要对软联接管进行捆扎的麻烦。

（9）换热器　淬火机床一体化的淬火液循环冷却系统，通常储液量为 $0.6m^3$ 左右，为了保证在淬火过程中大量的热量被及时从淬火液中带走，就需要配装换热器，目前应用最普遍的是不锈钢板式换热器，这种换热器结构紧凑、换热效率高、便于安装。

（10）电缆保护拖链　在淬火变压器移动的淬火机床中，为了便于淬火变压器的联接水路与电缆的随动，通常将其有序地置于一种重量轻，折弯灵便的电缆保护拖链中。在淬火机床上使用的拖链通常由铝合金或工程塑料制造。

（11）接近开关　这是一种非接触式的行程检测与控制元件，主要有电感式、电容式和永磁式三种，其使用原理是在一定距离范围内，运动工件处于接近开关端头时将感应出到位信号，其重复定位精度可达 ±0.1mm。

（12）旋转光栅和直线光栅　这是一种非接触式的对旋转轴的旋转或分度角度和移动件的移动距离进行检测与控制的元件，又称光电编码器。旋转光栅通常用在异步电机、伺服电机或分度转盘的主轴上；直线光栅通常用在工件移动或变压器移动检测中等。

（13）光电开关　光电开关种类较多，在淬火机床上常用的有对射型和反射型。例如，将光电开关装在机床操作门两侧，当操作工手臂或其他物件尚未离开安全位置时起保护作用，也可通过模板控制淬硬区域，工件旋转时径向或端面摆动超差时也可由光电开关检测并实现加热启动保护作用（以防触碰感应器）。

（14）流量开关和流量计　流量开关是一种根据流量大小可以输出开关信号的计量元件，又称流量继电器，在淬火机床上主要用于当感应器冷却水量低于一定值时，起到缺水启动保护作用。流量计可以对淬火液流量进行定量测量。涡轮流量计应用较多。它是一种流体振动型流量计，与自动补偿流量仪相配套，可以实现液流的压力、温度自动补偿和积算，使淬火工件达到要求的冷却效果。

（15）测量加热温度的元器件（红外和光纤）　红外和光导式测温仪均属非接触式测温装置，用在淬火机床上可直接测量淬火工件的感应加热温度，其中红外测

温仪具有测温距离远，精度高等特点，可分为便携式、在线式和扫描式三大类。光导测温仪具有光纤传感器尺寸小，便于在线，可测较小加热区域，适于近距离测量。

246. 淬火机床常用的数控系统有哪些?

目前国内外数控系统品种繁多，用途不尽相同，适合淬火机床特点的数控系统有如下几种：

（1）国产经济型数控系统　这种系统编程简单易学，操作方便，价格低廉，在中、低档数控通用淬火机床上应用。但是，该系统应用在通用淬火机床上存在一些问题：一是系统输出、输入接口是按机加工机床功能要求设计的，特别是输入接口相对较少；二是在执行相邻两条指令时，其间有 0.4s 间隔时间，不能做到加热结束后立即喷液（对小型工件一般要求加热后立即喷液）；三是选用双坐标数控系统一个用于升降、一个用于旋转（分度）时，双坐标同时连续运动时会相互影响，所以要将这种经济型数控系统用于通用淬火机床需进行必要的改造。

（2）国外经济型数控系统　国外的经济型数控系统有多种品牌，多种型号，其中以 Siemense802 系列常用。这种系统具有功能完善、性能良好、稳定可靠、精度高、储存程序量大等特点，但价格偏高、维修成本高。

（3）工业控制计算机数控系统　工控机应用于淬火机床可以充分利用 PC 机的硬件（如 586、Pentium Ⅲ）与软件（如 DOS、Windows、Win98/Me、WindowNT/2000）资源融合最新控制理论及网络技术，实现更为复杂的控制和更强的软件功能。

247. 通用淬火机床的传动方式一般有几种? 哪种比较稳定?

按主要传动型式可分为液压式和全机械式。液压传动具有结构简单、驱动力大、移动速度快（可达 150mm/s 以上）等优点。但存在移动速度不稳定、定位精度低等缺点，液压驱动感应淬火机床渐趋淘汰。全机械式传动分为 T 型丝杠、滚珠丝杠、直线移动导轨等多种传动型式。全机械传动具有移动速度稳定、定位精度高、易实现变速移动等优点。

按移动部分机械结构形式可分为滑板式、导柱式两种。滑板式是我国应用数量最多的结构形式，其床身往往采用经过时效处理的铸造或焊接结构，承载能力大，稳定性好，可以加工较大、较重的工件，适应范围最广，但该型式具有床身笨重，滑动不灵活，导轨加工复杂等缺点。导柱式结构在欧美国家较常见，这种结构的主要优点是机床重量轻，运动灵便，便于实现与淬火液循环冷却系统的一体化设计，但不太适应大、重工件的加工，在行程大时稳定性稍差（如工件振动）。

248. 淬火工件扫描淬火时，应如何选取工件移动或变压器感应器组移动方式?

淬火机床一般有两种传动方式，一种是工件移动并转动，另一种是工件转动不升降而变压器感应器组作升降移动。

两种传动方式的选定主要考虑以下因素：

1）从整个淬火机床高度（或长度）考虑，工件长度超过2m时，一般选用变压器感应器组移动。因为这样设计，淬火机床的总高度（或长度）可以较低（短）。扫描淬火机床的总高度如采用工件移动，一般为工件扫描长度的2倍以上；而如果采用变压器感应器组移动，机床总高度为工件扫描长度的1倍以上，两者相比，优越性可见。因此，小型通用淬火机床、凸轮轴、半轴、转向齿条淬火机均采用此种工件移动并转动的方式，而工件长度超过2m的立式淬火机均采用变压器感应器组移动方式。

2）从淬火工件的形状与重量考虑，如大齿轮单齿扫描机床，齿轮直径达6m，重量达20t，淬火变压器与感应器体积与重量均小，自然采用变压器感应器组移动方式较方便。

3）特殊情况考虑，例如轧辊淬火机床，虽然轧辊长而重，但由于变压器感应器组相对较重，工作时振动很大，此时仍采用工件移动方式，而变压器感应器固定不动。

4）近年来，德国一些感应加热公司对工件长度在750～1500mm的淬火机床亦采用变压器感应器移动结构，使淬火机床的总高度下降，而Z轴快进速度达到24m/min（400mm/s）。

249. 淬火机床主顶尖的转速应如何选取？

对淬火工件加热时转速的选取，从工件加热均匀性来讲，转速越快，由于感应器与工件间隙不匀产生的温度不匀影响越小。早期的淬火机床对转速范围一般设定为60～300r/min，有些机床是有级变速，有些机床则采用无级变速，用户可以任意选择。然而有些机床因特定条件，转速特低。如曲轴颈旋转淬火机，其主轴颈转速常用60r/min，而连杆颈转速则选用30r/min，这是由于连杆颈在淬火机床上通过摆动机构（四相连杆机构）产生转动，如转速太快，半环感应器不能稳定地跨到轴颈上随动，所以只能采用30r/min的低速旋转，此种转速对轴颈加热而言是不合适的，主轴颈采用60r/min是由于采用双速电机，设计上可简单的理由。

有一种论点，认为转速的选取，应该以工件加热周期来考虑，工件在一个加热周期中，旋转应不低于10次，就能保证工件圆周上温度均匀。据此计算，一般工件感应加热时间常在5～10s之间，如果5s转10转，则为120r/min，10s转10转，则转速为60r/min。

随着感应加热速度的发展，对于同步双频加热齿轮，齿轮的加热周期已缩短到0.1～0.2s。因此，其工件转速要求在不断增加，有些淬火机床主轴的最大转速已达到1600r/min。目前，淬火机床的转速达到600r/min的已不多见。另外，工件转速与冷却也有密切关系，对齿轮、花键轴而言，淬火冷却常采用喷液方式，工件转速太快，淬火液对齿的一侧冷却不足。因此，淬火机床的转速还是以600r/min或

300r/min 作为上限。另外，要研发加热结束后工件能及时降速的机械或电器部件，使工件既能快速旋转达到均匀加热的目的，又能慢速旋转，以达到均匀冷却齿轮类工件的要求。

250. 工进速度、快进与快退速度应如何选择？

对通用淬火机床而言，有相当多的工件是需要扫描淬火的。因此，它有工进阶段，用于扫描加热淬火；快进阶段，用于扫描但不加热阶段；快退阶段，用于退出工件。从减少机床待时（空闲）时间考虑，快进与快退的速度越高越好，这样可以提高工件的生产率。目前，较高水平的机床此快进速度达到 150mm/s 以上，对液压机床，此速度并不困难，但对机械传动的机床，由于要兼顾工进速度，又要简化结构，此种设计有一定难度。

工进速度，对通用淬火机床而言，一般采用无级调速，1 ~ 50mm/s 即能满足常用工件的技术要求。这是因为扫描淬火感应器有效圈高度一般不超过 50mm（有效圈高度过高，导致过渡区增宽），而扫描加热时间（质点进感应器到出感应器这一段时间）一般不超过 10s。

按 $v = H/t$ 计算，$t = 1 \sim 10s$。$H = 50$，$v = 50 \sim 5mm/s$

如果有效圈高度改为 10mm，$t = 1 \sim 10s$，$v = 10 \sim 1mm/s$

因此，工进速度在 1 ~ 50mm/s 已足够应付常用工件。

251. 通用淬火机床一般有哪些功能？如何确定？

（1）工件旋转及移动升降的功能　工件旋转及移动升降的功能，以满足一次加热及扫描淬火的基本需求。旋转速度对工件加热而言，一般认为转得越快，工件加热温度越均匀，特别是采用两根矩形管组成的纵向感应圈时，转速快比慢好。

对工件冷却而言，转速不需太快。对有花键的工件或齿轮，转速太快，会使花键或齿的一侧冷却不足。图 8-6 所示为花键冷却示意图。生产实践证明，外圆的线速度以不超过 500mm/s 为宜。因此，通用淬火机床的工件转速一般设计为 60 ~ 360r/min。一次加热淬火时，一般工件直径越小，转速可以越快，选上限值；直径越大，转速应越慢，选下限值。其原因是直径大，外表面处的线速度越大，对冷却不利。

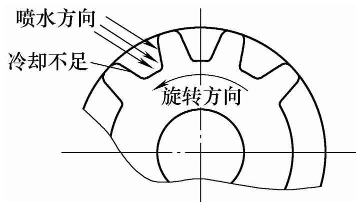


图 8-6　花键冷却示意图

（2）工作转台快速下降的功能　通用淬火机床常要处理齿轮、支承轮等一次加热外圆的工件。此时，如果不是采用感应器喷液，就需将加热后的工件快速落入喷液圈中。工作转台快降速度如果为 150mm/s，就能保证加热工件在 1s 内将工件落入喷液圈中，1s 的预冷时间对中碳钢齿轮类一次加热工件来说是合适的。

（3）分段一次淬火功能　例如，处理凸轮轴的凸轮，8 个或 12 个凸轮采用同一规范，工件能从上到下或从下到上顺序进行。从上到下顺序对凸轮更有自回火作

用。

（4）扫描淬火时工件不转动的功能　扫描淬火时，工件不转动的功能适用于处理矩形导轨等工件。

（5）工作行程中自动变速的功能　工作行程中自动变速的功能，适用于处理锥形工件或具有台阶的轴类工件。

（6）工作行程中淬火变压器与感应器向工件前进（靠近）或后退（远离）的功能　感应器在工作行程中向工件前进或后退，适用于用半圈感应器处理锥形体。它可使工件与感应器接线端保持等间隙，以提高感应器效率。此外，变压器、感应器同时前进或后退功能还能用于一种既能淬火加热又能回火的葫芦形双孔感应器的使用。图 8-7 为葫芦形感应器示意图。

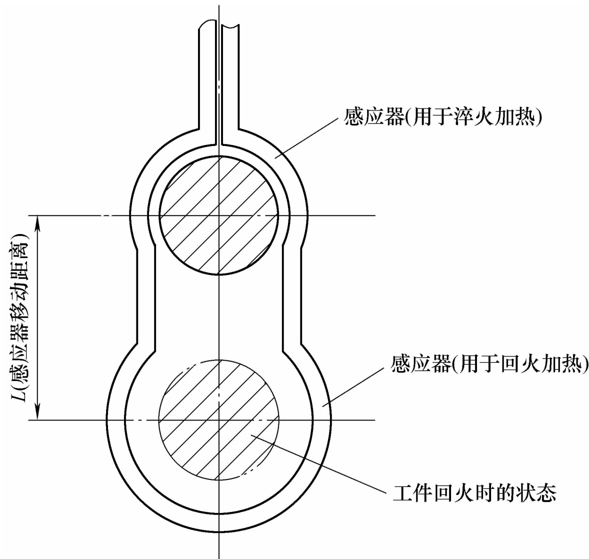


图 8-7　葫芦形感应器示意图

（7）附件与扩展功能　通用淬火机床常有一些附件及扩展功能的部件，以便用户根据实际需要选用。

1）分度工作台。当处理小工件时，可选用 6 或 8 工位分度工作台。

2）防弯曲校正辊。处理细长轴件时，有此装置可减少轴件淬火变形。

3）上顶尖中心架。当处理超过机床夹持工件长度的工件，而淬火长度在机床工作行程范围内时，可以用上顶尖中心架。此时，上顶尖部件移转一个角度，工件可由中心架定位。

4）双顶尖或多顶尖。一次可同时处理两个或多个工件，提高机床生产率。

5）监测保护与计量仪器的完备。控制淬火液流量的流量计（或流量开关），缺水及感应器接地保护，淬火液温、超限等多种监测、保护仪器。

252. 什么是紧凑结构感应淬火装置？有何特点？

变频电源、淬火升降机构安装在一起的感应淬火装置，称为紧凑结构感应淬火装置。该装置具有占地面积小、安装方便、生产率高的特点。图 8-8 所示为一台紧凑结构感应淬火装置。它是双工位双主轴的机电一体化的立式感应淬火装置，采用双工位、双主轴主要是考虑高的生产率需要。其特点如下：

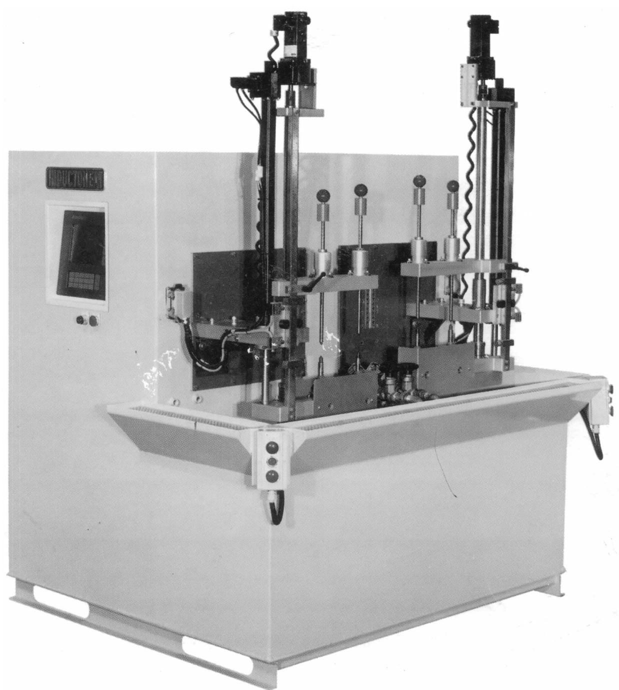


图 8-8　紧凑结构感应淬火装置

1）它可根据用户需要配备不同频率（10kHz、30kHz、200kHz）、不同功率（30kW、50kW、75kW、100kW、150kW）的晶体管固态电源。

2）具有快换感应器夹头。

3）淬火变压器换匝比有一个外部的转换开关，便于调整。

4）上顶尖不需工具即可调整。

5）机床每个主轴能装长 762mm、重 10kg 的工件（扫描长度为 610mm）。两个工位是独立工作的，也可以在一个工位进行工件的一种工序，另一工位进行另一工序。机床长 1080mm、宽 2045mm、高 2360mm（托架升起时），重 1360kg。作为四主轴机床，其性能与占地面积、设备重量比是较先进的。

6）配有离心泵、换热器、压力表、温控器和阀组成的冷却水系统及淬火液系统。

7）PLC 触摸屏控制，CRT 显示所有参数，并可选装能量监控器或上升时转速等。

8）主轴转速为 0 ~ 139r/min，扫描速度为 2.5 ~ 76mm/s 或 5 ~ 152mm/s，任选。

253. 什么是拾取式淬火机床？

拾取式淬火机床的感应器与喷液圈安装在固定位置上，而工件是移动的，可自

动地进出感应器，生产可连续进行。图 8-9 所示为一种齿轮拾取式淬火机床。

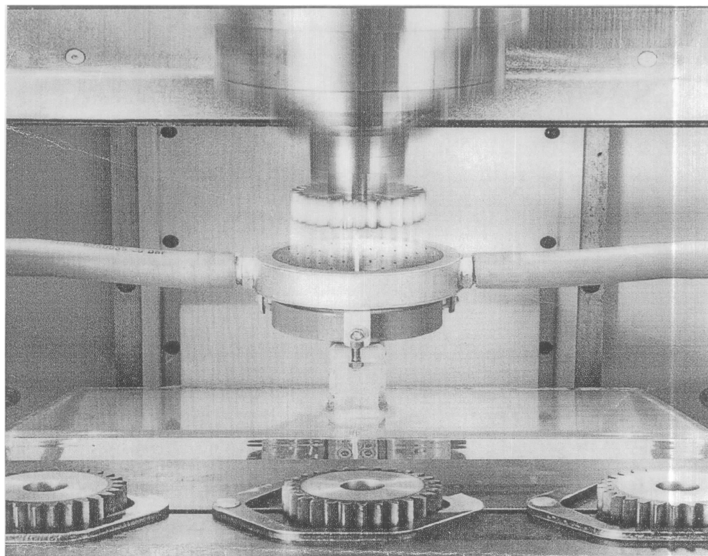


图 8-9　齿轮拾取式淬火机床

254. 什么是双输出电源淬火装置？

双输出电源的淬火装置是一个电源同时供给两套淬火变压器感应器组的装置。双输出电源的淬火装置用于大齿轮淬火时，可同时进行一个齿轮两个单独齿的扫描淬火，如图 8-10 所示。

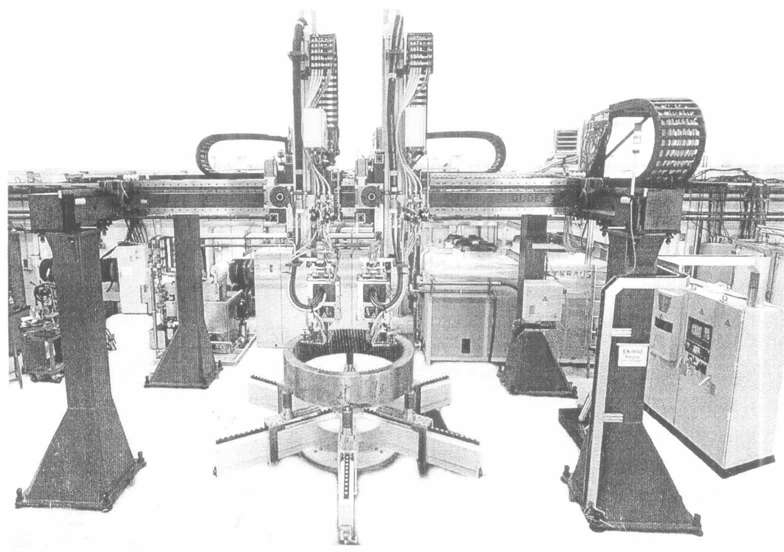


图 8-10　双输出电源供给两个单齿淬火

255. 钟形壳全自动淬火机床是怎样的?

钟形壳是等速万向节部件的主要零件，承受很大的扭矩，需要很高的疲劳强度与抗冲击强度。钟形壳的柄部与内球道均需表面淬火，柄部与台肩处的淬硬层要求连续，球道或滑套内表面淬火，因结构原因，技术更为复杂（见图 5-23a）。钟形壳感应淬火机床生产线，国、内外制造厂均有各种类型，在不断发展改进。图 8-11 所示为钟形壳全自动感应淬火机床。



图 8-11　钟形壳全自动感应淬火机床

该钟形壳全自动感应淬火机床的特点如下：

1）具有进料滚道，两个机械手装、卸料，左右两个工位的作用为：右工位专用于柄部淬火，左工位专用于内球道或滑套内孔的淬火。机床设计具有高度的柔性，在机床规格范围内的钟形壳或滑套均能处理、调整，工作极为简单。

2）其工作过程如下：装、卸料输送链将工件输送到机床入口处，1 号机械手将工件从入口处抓取到左、右工位中间的分度桌第 1 位置，分度桌转到 2 位置，可进行杆部的淬火（右位置是变压器感应器升降的），3 位置将柄部冷透，4 位置是机动位置，第 5 位置可对滑套进行角度定位，第 6 位置是干燥台，将工件干燥，2 号机械手将工件从分度桌抓取装到左位置的夹头上，左位置是工件升降的。

3）左工位是进行钟形壳内滚道或滑套内孔淬火的工位。如图 8-12 所示。滑套感应器装在下面，工件在上面，滑套下降前已进行了角度定位，保证与三柱感应器相吻合。

4）淬火机床配有 Siemense 840D 数控系统，至少可编 150 个不同工件的程序。

5）感应器能作 X、Y、Z 调整。

6）此装置左侧是一个 CRT，显示工况与故障，右侧有一台 PC，用以计算、存储相关工艺资料。

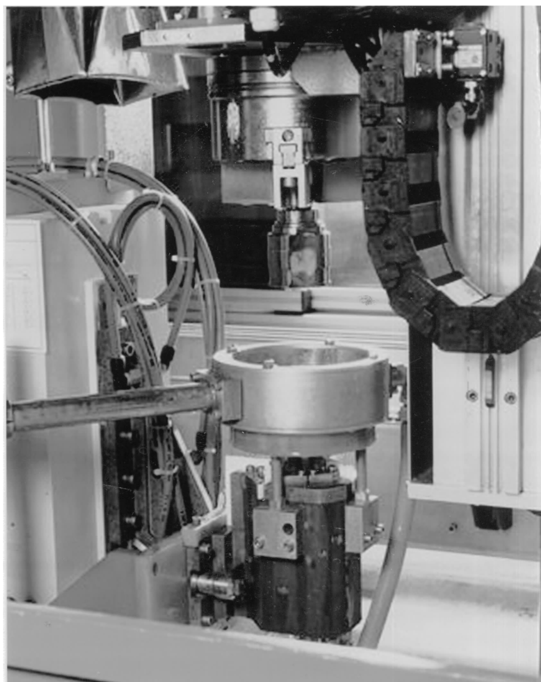


图 8-12　滑套内孔准备淬火

256. 什么是族类零件感应淬火机床？

族类零件指结构相似而尺寸不同的零件，如驱动轴、转轴、等速万向节的钟形壳零件等。族类零件淬火机床是指能自动或略加调整即能处理同族类零件的淬火机床。

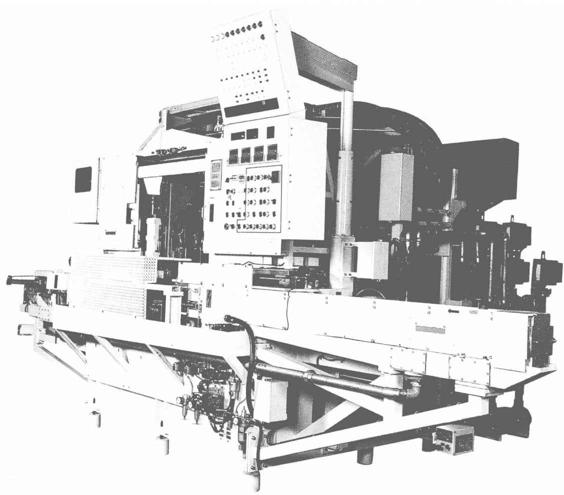


图 8-13　BJ 型转轴淬火机床
（日本高周波热炼公司）

BJ 型转轴淬火机床如图 8-13 所示，主要用以处理最多达 15 种转轴的淬火与回火。机床是卧式结构，由淬火部分、回火部分及传送、装载机构等部分组成。机床还设有防变形辊子，具有控制工件弯曲变形的功能。

BJ 型转轴淬火机床工作流程如图 8-14 所示。从前工序下来的工件通过输送带进入装载

机，经过磁尺测长，进行机种判别，装载到淬火位置上，进行工件定心或磁尺再次检测。淬火时，由防变形辊子与调节顶尖气缸压力来控制变形。淬火后的工件由输送带送到回火部分，升降机和传送装置一一将工件送入多圈的回火感应器中，回火后的工件通过再次冷却流入下一工序。

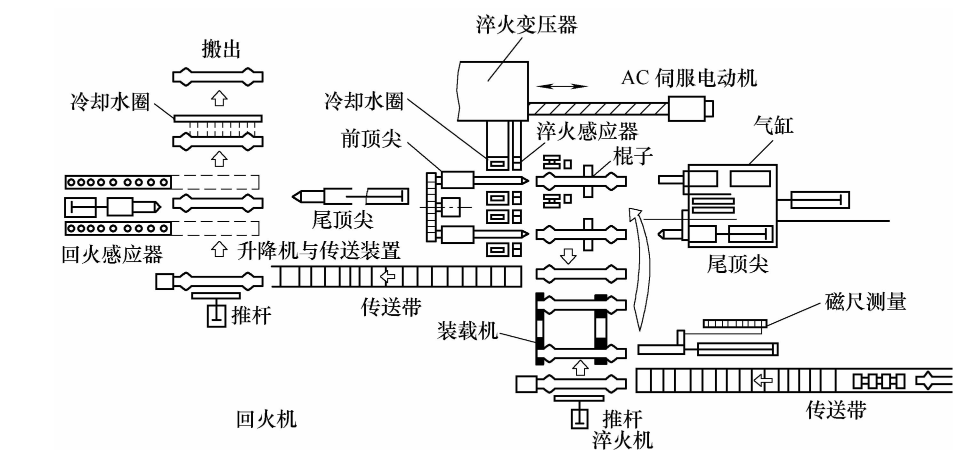


图 8-14　BJ 型转轴淬火机床工作流程

257. 国产通用淬火机床有哪些典型品种与规格?

国产通用淬火机床的典型品种与规格见表 8-2。

表 8-2　国产通用淬火机床的典型品种与规格

序号	设备名称	特点与规格	产地
1	大型淬火机床	电源功率 1200kW，最大直径 1500mm，最大长度 6500mm	天津
2	卧式轴类数控淬火机床	轴类最大长度 8000mm	天津
3	立式重型数控淬火机床	最大淬火长度 2000 ~ 5000mm，工件回转直径 ≤600mm	洛阳
4	立式淬火机床	轴类最大直径 1000mm，最大淬火长度 10 000mm	西安
5	多工位淬火机床	最大淬火长度 1600mm，回转直径 ≤500mm，数控系统类型，西门子 802/国产 CNC/PLC + 触摸屏	洛阳
6	卧式轴类淬火机床	一般轴类（长度 600 ~ 3000mm，直径 ≤300mm），西门子 802/国产 CNC/PLC + 触摸屏	洛阳
7	GCBYZ 立式通用淬火机床	重型轴类（轧辊等）及盘类（长度 1000 ~ 5000mm，直径 ≤500mm），西门子 802/国产 CNC/PLC + 触摸屏	洛阳
8	GCBYQ 立式通用淬火机床	一般轴类（半轴、凸轮轴、传动轴等）及小型盘类（长度 600 ~ 3000mm，直径 ≤300mm），西门子 802/国产 CNC/PLC + 触摸屏	洛阳

258. 专用感应淬火装置有哪些特点？

专用感应淬火装置是针对一种感应淬火件而设计与制造的。这种装置除了具有高的可靠性、先进性、耐用性，以及便于操作与维修的特点外，还具有高的生产率与低的劳动强度的特点。专用感应淬火装置常是半自动或全自动型，由于是针对一种淬火件设计与制造，其造价比通用淬火机为高，一次投资费用亦较大，要改型比较困难。因此，在选择时应慎重考虑。

259. 专用感应淬火装置有哪些典型品种与规格？

1）国外专用感应淬火装置的典型品种与规格见表8-3。

表8-3　国外专用感应淬火装置的典型品种与规格

序号	设备名称	规　　格	产地
1	滚珠丝杠淬火成套设备	可控硅中频电源，二档频率（10kHz及30kHz，160kW），计算机控制淬火伸长量，半环型感应器保证等间隙加热，工件最长为6m	德国
2	曲轴半自动淬火成套设备	可控硅中频，10kHz，225kW，4工位带功率脉动装置，6通道，可换6种规格感应器	德国
3	曲轴齿轮淬火机	曲轴齿轮加热时有保护气氛保护，采用10kHz、225kW中频发电机和kWH1750/300曲轴颈淬火机配套	德国
4	齿轮淬火机	可控硅中频，10kHz，100kW，齿轮模数为6~40mm，直径为3000mm，垂直行程为900mm	德国
5	汽车转向齿条淬火成套设备	450kHz、R500型高频电阻加热，带设备冷却水循环装置	英国
6	离合器片高频淬火成套设备	300~500kHz，45kW电子管式双工位工作	英国
7	CNC控制曲轴淬火成套设备	10kHz，300kW，可控硅中频电源，二工位曲轴淬火，功率脉动，带能量控制器	美国
8	轧辊双频淬火成套设备	双频：50Hz、1000kV·A预热，250Hz、750kW中频最后加热；立式淬火机床，直径850mm，长度≤5250mm	比利时
9	石油管感应加热成套设备	外圆表面加热、内孔淬火，100kW、4kHz淬火加热，25kW、4kHz回火	美国
10	自动曲轴感应淬火成套设备	10kHz，2×120kW可控硅电源，3#工位主轴颈淬火、2#工位油封法兰及小细颈淬火1#工位连杆轴颈淬火	德国
11	汽车凸缘轴淬火装置	TR200kW/12kHz电源及立式专用淬火装置	西班牙

（续）

序号	设备名称	规　　格	产地
12	等速万向节淬火装置	TM 型 5～15kHz 立式钟形壳专用；上位置淬钟形壳杆部，下位置淬内球道，交替进行	西班牙
13	纺机锭杆感应淬火、回火装置	400kHz、20kW 用于淬火，200kHz、3.5kW 用于回火，长度 50～400mm；卧式淬火机，旋转辊带动工件旋转，推料由 DC 伺服电动机驱动	德国
14	汽车制动蹄局部加热专机	CE 型高频电源，450kHz，60kW，一个感应器加热 4～5 个局部点，淬火机只将工件升降	美国
15	瓦楞辊感应淬火成套设备	450kW，4kHz IGBT 电源，立式淬火机，辊径 500mm，长度约 4100mm，NC 控制	德国
16	机床导轨淬火机	电源频率从 10～60kHz 多级可调	西班牙
17	回转支承淬火装置	直径 3000mm 回转支承淬火	德国
18	大轴承内孔淬火机成套设备	IGBT1000kW 电源，1～4kHz 及配套大流量水泵	意大利
19	凸轮轴卧式淬火成套设备	一次加热多根凸轮轴，仿形感应器，生产率达 30 件/h	德国
20	三柱滑套全自动淬火成套设备	IGBT400kW，10～30kHz，双工位二个机械手，有进、出料装置	西班牙

2）国产专用感应淬火装置的典型品种与规格见表 8-4。

表 8-4　国产专用感应淬火装置的典型品种与规格

序号	设备名称	规　　格	产地
1	曲轴感应淬火成套设备	全自动 4 缸/6 缸，350～550mm，3×160kW，工控机 + PLC，60 件/h	洛阳
2	曲轴淬火成套设备	TQK 全自动动曲轴淬火机床，1200～5000mm，200～500kW，CNC 系统控制，拖板移动重复定位精度≤20μm	十堰
3	GC14250 滚道感应淬火机床	400～2500mm，75°角倾斜安装，双滚轮驱动自动定心，变频无级调速摩擦传动	天津、上海、洛阳
4	数控齿轮淬火机床	直径 300～4000mm，模数 8～40mm，三轴数控二轴联动，靠模浮动定位	天津
5	数控导轨感应淬火机床	淬火变压器（感应器）移动淬火，设有淬火间隙数控跟踪功能	天津、无锡

（续）

序号	设备名称	规　　格	产地
6	喷油器壳体感应淬火机床	五工位转盘式结构，工作台上工件主轴分布直径400mm，最快分度时间1s，PLC+人机界面	天津
7	导柱表面淬火	ϕ900mm×1000mm立式淬火机床。500kW、4～8kHz，感应器托板升降速度48～1200mm/min	西安
8	轮毂轴承淬火机床	轮毂轴承类感应淬火（回火）；工件升降，负载前后移动；PLC+触摸屏/工控机	洛阳
9	连杆退火机床	多工位，摩托车连杆渗碳件局部退火，连续进给	洛阳
10	转向齿条电阻加热淬火机	高频电阻加热尺寸：400mm；电源60kW、250kHz	洛阳、长春等
11	齿轮埋液淬火机床	各种齿轮单齿埋液淬火	天津
12	长内孔淬火机床	内径：125mm，长度：3m；电源功率：200kW	无锡
13	多功能、多自由度淬火机床	轴类：光轴、台车轴、齿轮轴等；盘类：内、外齿（直、斜）滚道；齿条（直、斜）伺服坐标数：5轴，电源350kW	洛阳
14	凸轮轴淬火机床	一般轴类（半轴、凸轮轴、传动轴等）及小型盘类，长度600～3000mm，直径≤300	洛阳 天津
15	六工位转盘淬火机床	小型轴类及盘类，长度≤300mm，直径≤300	洛阳
16	双工位双负载淬火机床	轮毂轴承、CVJ、支重轮、托带轮、齿轮、球头销、拨叉、小凸轮轴等，长度≤300mm，直径≤300	洛阳
17	大型盘类工件淬火机床	轮、盘类，最大直径8000mm	天津
18	数控齿轮淬火机床	齿轮类，最大直径5000mm	天津
19	纺织针筒淬火装置	直径：1000mm；400kW、250kHz；采用感应淬火比火焰淬火节约能源约40%	无锡
20	单轴整体淬火机床	卧、立式：半轴、大曲轴、凸轮轴等，扫描淬火	上海
21	GCWQJ浸液曲轴淬火机床	轿车曲轴及货车曲轴，长度300～2000mm	洛阳
22	盘类工件浸液淬火自动线	齿轮、链轮（驱动轮）、引导轮等（直径600～1200mm）；PLC+触摸屏/工控机	洛阳
23	TJ/CVJ专用淬火自动生产线	TJ（三柱滑套）、CVJ钟形壳类工件（长度≤260mm，直径≤200）；PLC+触摸屏/工控机	洛阳

（续）

序号	设备名称	规　　格	产地
24	斜挂式轴承圈滚道淬火机床	大型轴承圈、回转支撑（直径 600～6000mm）；PLC＋触摸屏/工控机	洛阳
25	工件自定心式齿圈（单齿、滚道）淬火机床	大型轴承圈、大型齿圈、回转支撑（直径 1000～8000mm）；PLC＋触摸屏/工控机	洛阳
26	履带销套感应淬火自动线	履带销套 T135、T154、T175、T190、T216、T228；PLC＋触摸屏/工控机	洛阳
27	履带销轴感应淬火自动线	履带销轴 T135、T154、T175、T190、T216、T228；PLC＋触摸屏/工控机	洛阳
28	履带链轨节感应淬火（回火）自动线	链轨节 T135、T154、T175、T190、T216、T228；PLC＋触摸屏/工控机	洛阳
29	GCWQQ 全自动曲轴淬火机床	轿车曲轴（长度 300～600mm）；PLC＋触摸屏/工控机	洛阳

260. 曲轴感应淬火机床是如何发展的？

德国感应加热设备制造厂研发旋转曲轴感应淬火技术较早，从浸液淬火到喷液淬火，从半自动淬火机床到全自动淬火机床，从每次加热一个轴颈到多个轴颈，从固定一种曲轴尺寸到柔性可变换多种尺寸，从手动换感应器到自动换感应器，从一个浸液槽到多个浸液槽等，进行了许多改进。图 8-15 所示为从半自动曲轴感应淬火机床到全自动柔性曲轴感应淬火机床的发展过程。

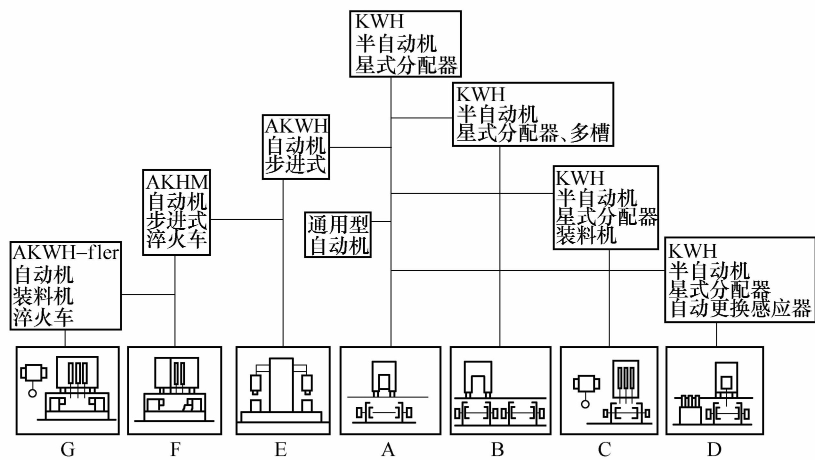


图 8-15　从半自动曲轴感应淬火机床到全自动柔性曲轴感应淬火机床的发展过程

261. 半自动曲轴浸液淬火机床是怎样工作的？

半自动曲轴浸液感应淬火机床见图 8-16。感应淬火机床由淬火槽和可移动的淬

火小车组成。淬火槽中装有淬火液及具有四个能夹持曲轴并旋转的星形支架，左侧的驱动装置用于曲轴的旋转，右侧的分度装置，使星形支架快速翻转 90°，将工件从加热工位转到淬火工位，即落到淬火液面下。淬火槽中有流动循环的淬火液。针对淬火轴颈的槽底设计有一个可移动的喷液器，淬火液泵不断地将淬火液送到喷液器使淬火轴颈旁的淬火液搅动并循环流动。喷液器位置可随轴颈淬火部位移动。淬火小车上放置有淬火变压器、感应器及中频电容器柜，以缩短振荡回路，减少电能损耗。淬火变压器悬挂在淬火小车上的四连杆平行机构上。感应器（包括水、电）连接在淬火变压器二次绕组上，采用快换机构，通过手柄与凸轮机构更换感应器，一般在 15s 内完成。安装在小车顶部的升降齿轮及平衡卷式弹簧，用以升降变压器感应器组，并使感应器能以一定重力压在所加热的轴颈上，等间隙跟踪，加热后感应器自动上升，星形支架将加热后的轴颈快速浸入淬火槽中（ <1.5s），而另一个未加热轴颈则转到待加热位置。

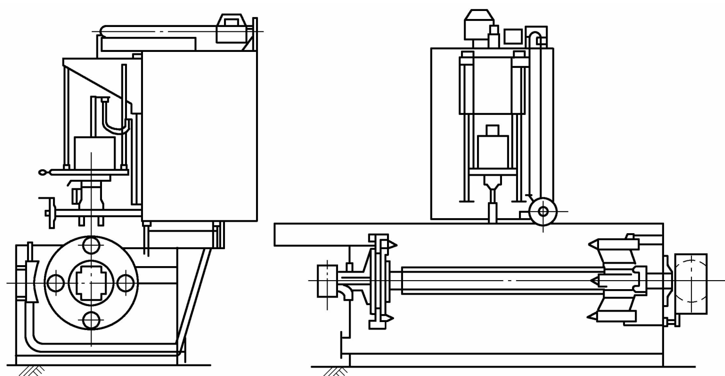


图 8-16　半自动曲轴浸液感应淬火机床

电容器柜的板上还装有功率脉动装置，由接近开关与多个撞块组成。淬火机后，装有拖链，拖链上安有柔性中频同轴电力电缆与进、出水软管及控制电线，以配合淬火小车在淬火槽的左右移动。由于曲轴主轴颈、连杆轴颈、第一主轴颈、油封法兰、花键轴、止推面等部位淬火要求不同，因此，需要不同的感应器与不同电规范（电压、功率、接入电容量等）。因此，感应器底部后侧装有编码器，每种感应器有一个编码，主轴颈感应器装入快换夹头，计算机系统即接纳该感应器编码的信号，进行该程序工作。工作方式是一个感应器进行一种尺寸的轴颈淬火。

这种半自动曲轴浸液淬火机床以其小巧、灵活、便于变换曲轴产品等优点，在欧美十分流行，其缺点是劳动量大、产量低。改进的机型是一个淬火小车配两个有星形支架的床槽，当一个床槽在装卸曲轴时，另一个床槽可进行淬火操作。这样，曲轴的产量可提高 20% 左右，减轻劳动量的改进是自动更换感应器，现在已有此种新产品。

这种浸液淬火的工艺，曲轴淬火后必须进行炉中回火。为节省生产面积，这种回火炉的炉体的现行设计是往高处发展，以适应生产率的要求。

262. 自动更换感应器的半自动曲轴淬火机床是怎样工作的?

自动更换感应器的半自动曲轴淬火机床如图 8-17 所示。在半自动曲轴淬火机基础上进行了改进，主要解决操作人员更换感应器的疲劳问题。七个一组感应器贮存在一个储料匣内，当操作者将四根曲轴装上星形支架顶尖上后，机床自动按顺序进行轴颈加热，星形支架分度，曲轴浸液淬火。一组轴颈完成淬火后，淬火小车的驱动马达按顺序使小车停到指定位置并自动换感应器，其动作与数控镗床、铣床相似。这种淬火机床能解决操作人员的疲劳问题，机床生产率一般为每小时 7 ~ 15 根曲轴，主要取决于曲轴轴颈数，通常按 30s 淬一个轴颈计算。

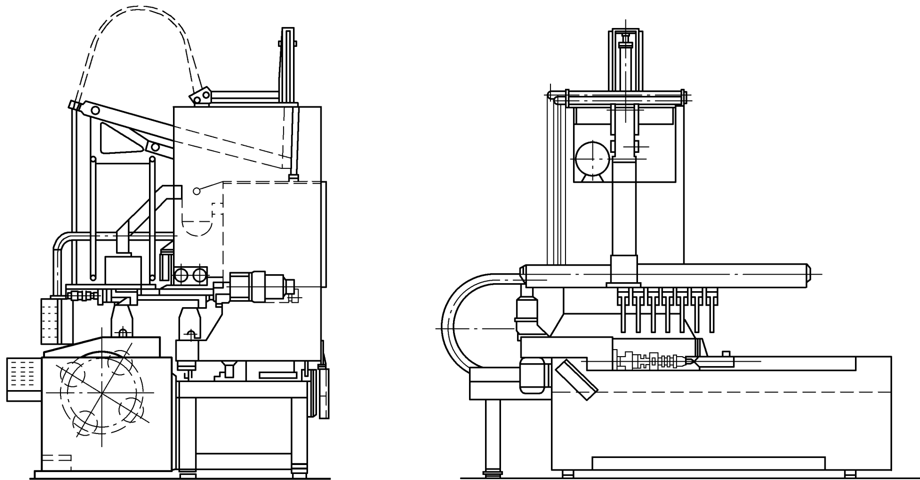


图 8-17　自动更换感应器的半自动曲轴淬火机床

263. AKWH 全自动曲轴淬火机床是怎样工作的?

AKWH 全自动曲轴淬火机床如图 8-18 所示。全自动曲轴淬火机床为隧道式，长约 12m，宽 3. 5m，不包括晶闸管电源、液压站及两种冷却水循环装置。电源为 3 ×160kW/10kHz 晶闸管电源。特点是主轴颈淬火时有三个校正辊，防止曲轴弯曲

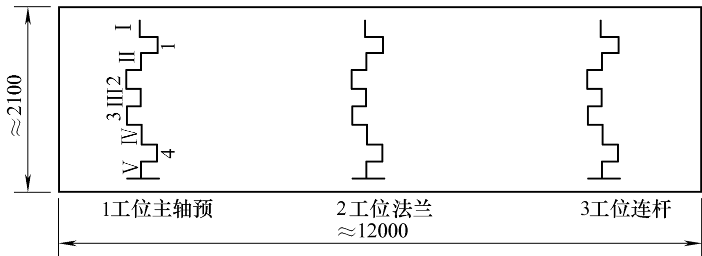


图 8-18　AKWH 全自动曲轴淬火机床

变形。

工作程序如下：

1）在第一工位，先加热 2、4 主轴颈，校正辊压 3 主轴颈。

2）加热 1、3、5 主轴颈，校正辊压 2、4 主轴颈。采用功率 75 ~ 85kW，时间 12s。

3）在第二工位，加热油封法兰。采用功率 40 ~ 60kW，时间 4s。

4）第三工位，加热连杆轴颈，先加热 1、4，后加热 2、3，校正辊压 2、4 主轴颈。采用功率 55 ~ 75kW，功率脉动，淬火液用聚合物水溶液，感应器下带两侧喷液器，淬火变压器厚 70mm，是铁氧体铁心，生产率为 45 件/h（四缸曲轴长为 650mm，主轴颈为 ϕ65mm，连杆轴颈为 ϕ50mm × 48mm），淬火后曲轴伸长 0.8mm 左右，弯曲摆差在 0.32mm 左右。

全自动曲轴淬火机根据生产率要求，可以采用大功率电源，在一个工位上处理全部连杆轴颈，另一工位上处理全部主轴颈，主要用于轿车曲轴。

264. 全自动柔性曲轴淬火机床是怎样工作的？

由于产品结构的不断更新及多品种产品生产需要，柔性制造单元得到蓬勃的发展，为曲轴颈感应淬火服务的全自动柔性曲轴淬火机床应运而生。全自动柔性曲轴淬火机床具有高生产率、低劳动量，略加调整能适应多品种曲轴生产的特点。现在，全自动柔性曲轴淬火机床一般可生产四缸及六缸曲轴多个品种。在淬火部位上，除主轴颈、连杆轴颈（多种宽度）外，还可进行端轴颈、法兰等部位淬火。

图 8-19 所示为一种龙门式曲轴淬火机床。其一侧进行连杆颈淬火（中频），另一侧进行主轴颈淬火（中频）；前部则用超音频电源进行法兰淬火，最后检测摆差。

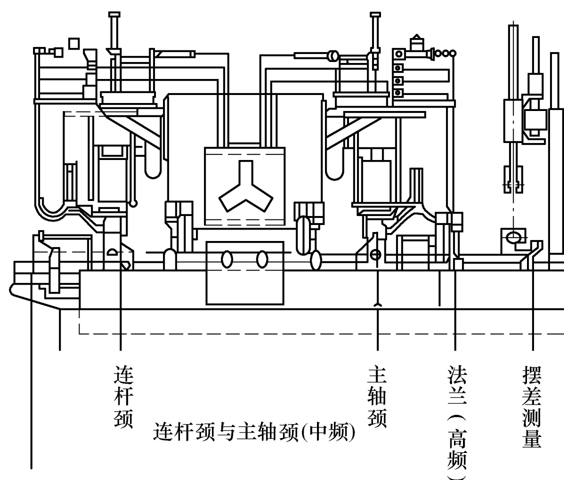


图 8-19　所示为一种龙门式曲轴淬火机床

柔性曲轴淬火机床的控制系统及特点如下：

1）从电源来讲，当前已采用 IGBT 晶体管电源，并且有采用可变频率的电源，如 10kHz/40kHz 或 10kHz/25kHz 的双频电源。

2）控制盘上有程序器，可以设定加工顺序，感应器位置，加热、预冷、冷却时间，输出功率（包括旋转角度改变功率，即按不同功率分配功率）。监视（上、下限值）加热时间，预冷、冷却、输出功率、电压、电流，中间轴颈弯曲量，水流量、水温，能量监控值等。全自动曲轴淬火机的计算机现在大都已采用 siemens810，还有采用 840 的。能量监控器已普遍用在该装置上，特殊的还有振荡因素计，监测感应器是否变坏，还有监测曲轴弯曲变形及用打印机打印监测项目与弯曲量等。

265. 静止加热曲轴颈淬火装置有什么优点？

21 世纪初，美国 Inducto-Heat 公司研制出了一种新的曲轴颈感应淬火与回火工艺，简称 SharP-C 工艺。实现这种工艺的淬火装置称为静止加热曲轴颈淬火装置。它具有以下优点：

1）操作简单，重现性好，易于维护，设备紧凑，在某些应用中设备占地面积仅为旋转淬火机床的 20%。

2）加热时间短，每个轴颈一般为 1.5 ~4s，因此变形减少。而旋转淬火时，曲轴颈的加热时间常为 7 ~12s。

3）加热时间短，减少了表面的脱碳与氧化，减少晶粒长大，热传导损耗少。

4）静止式加热的感应器是包住整个轴颈表面的，辐射对流损失少，因此，加热效率高。淬火工艺的控制性比较好，不易出现马鞍形淬硬层。

5）这种装置的感应器不使用间隔定位块，使用寿命长。

6）这种机床除淬火外，同时提供感应回火。回火时间短，温度比一般回火温度略高。

7）感应器的结构为上下两个厚铜块构件。它由数控机床加工而成，没有钎焊部分，因此不易变形，构件少，可靠性高。它与轴颈的间隙比旋转式半感应器为大，这样减少了应力腐蚀与应力疲劳。这种感应器的使用寿命为半环形感应器寿命的 4 倍以上。

8）由于感应器的磁力线呈封闭式，它的功率因数非常高。

9）静止式加热的节能来自以下几个方面：①感应器效率高；②加热时间短，轴颈传往心部及侧面的热量少；③从淬火后转到回火工位，曲轴要冷却到装卸温度，由于曲轴上余热少，因此所需冷却量亦少；④感应回火更是一个节能工艺，它的回火电效率达到 96% ~98%，而且能量是局限在轴颈部位，不是整根曲轴全部加热回火。

10）由于氧化皮减少，对装置的过滤要求降低。

266. 立式凸轮轴淬火机床一般有哪两种结构?

立式凸轮轴淬火机床有立式双工位凸轮轴淬火机床和单工位双淬火变压器感应器组立式淬火机床两种结构。

(1) 立式双工位凸轮轴淬火机床　左工位可以淬凸轮部分，而右工位可以处理轴颈部位。凸轮轴上的凸轮数与轴颈数是不同的，以四缸凸轮轴为例，进、排气凸轮共有 8 个，而支承轴颈只有 3 个。支承轴颈宽度比凸轮宽度大许多，加热面积大，考虑对双工位淬火机床交替加热，负载平衡及使用功率相近，为此，凸轮工位采用双孔感应器，一次加热两个凸轮，而轴颈工位则采用单孔感应器，一次只淬一个轴颈。这种双工位凸轮轴淬火机床除升降机构、淬火变压器及感应器等每个工位各需一套外，其电容器部分可以有一部分是公用的，如图 8-20 所示。

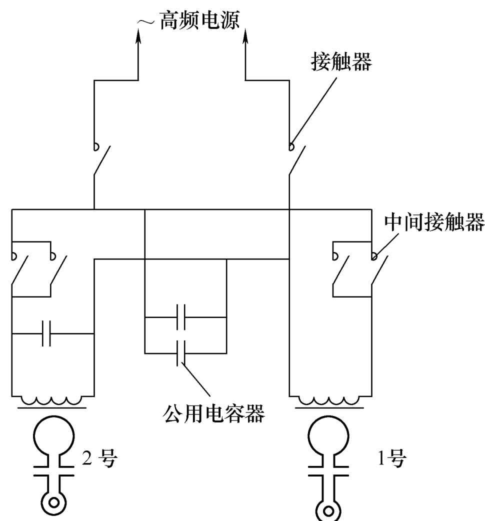


图 8-20　立式双工位凸轮轴淬火机床公用电容器

(2) 单工位双淬火变压器感应器组立式淬火机床　该淬火机床如图 8-21 所示。它采用一个立式升降机构，两套淬火变压器感应器组，一套用于淬凸轮，另一套用于淬轴颈。两套感应器均是双孔的。两套淬火变压器感应器组相互呈 90°交叉，共对着淬火机床的双顶尖中心线。为此，一套感应器的两个孔是左右配置，而另一套感应器的两个孔呈前后分布，如图 8-22 所示。

以上两种淬火机床采用按顺序分段一次淬火方式，但对中频电源来说，由于用两个工位交替加热，其暂载率是较高的。这类淬火机床用 200kW、8kHz 中频电源，生产四缸发动机凸轮轴的生产率可达到 15 ~20 根/h。

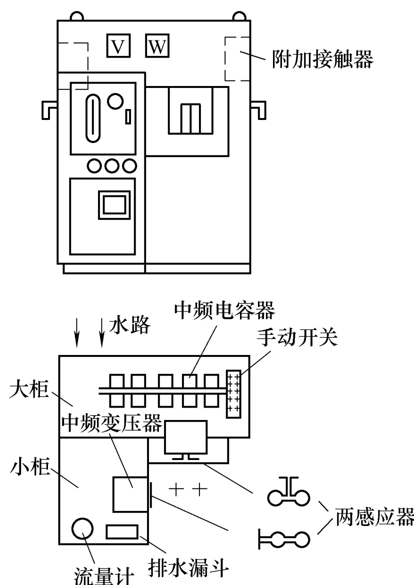


图 8-21　单工位双淬火变压器感应器组立式淬火机床

267. 一次加热凸轮轴所有淬火表面的淬火机床是怎样的?

一次加热凸轮轴所有淬火表面淬火机床的淬火方法是凸轮轴所有淬火表面同时加热，随后立即移到淬火位置进行淬火。其生产率可达 200～300 件/h。工件从加热位置移到淬火位置的时间应尽量快，它取决于工件材料的临界冷却速度。此种淬火方法主要用于铸铁凸轮轴，特别是合金铸铁，因为合金铸铁的临界冷却速度较低。

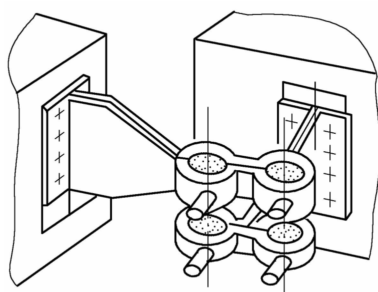


图 8-22　两套淬火变压器感应器组呈 90°垂直相交分布

淬火机床采用卧式结构，由床身、V 形托架、活动杆、带顶尖的滑台、淬火变压器感应器组、电容器和淬火槽等组成。机械动作由液压操控，托架将工件托住，上升并下降到位，然后由活动杆配合动作；滑台上的两个顶尖夹住凸轮轴作横向移动，将凸轮轴进入或送出感应器；机床左端主轴箱由液压马达带动凸轮轴旋转，转速可在一定范围内无级调速。在感应器左边有一铜接地环，如果凸轮轴在顶尖上未夹正，则在横向移动时会先碰到接地环，产生信号，停止动作。其感应器如图 8-23 所示。

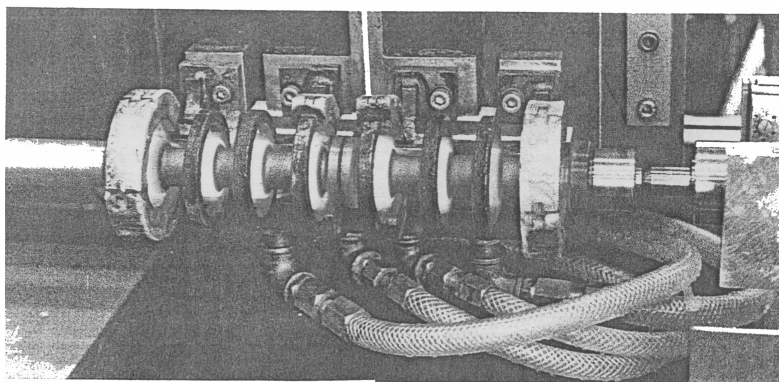


图 8-23　一次加热凸轮轴所有淬火表面的感应器

268. 双工位气缸套淬火机床是怎样工作的?

图 8-24 所示为双工位气缸套淬火机床。

该淬火机床上设有左右两个相同的工位。当一工位进行淬火时，而另一工位即可取下淬过火的工件和装上一个要淬火的工件。在淬火机床的床体中装有：电容器组、中频变压器和两个将变压器接到电源上的中间接触器。将变压器二次绕组的接触板由上前壁引出，此处用水平连接汇流板将内表面淬火感应器接到接触板上。两个工位上的变压器是轮流工作的，所以公用电容器组是自动地接到进行淬火的变压

器上的。在床体前板上装有测量仪表和信号灯。在床体前面装有垂直的导柱，左右位置的托架沿该柱上下移动。用链条和钢丝绳使托架移动，这些链条和钢丝绳跨过机床顶上的链轮，缠在托架垂直移动变速器的导轮上，变速器安装在床体的侧壁上。为了在淬火过程中获得均匀的加热和冷却，缸套应不断地旋转。装有的转台减速器是通过垂直轴和齿轮来转动的。垂直轴和齿轮在转台支承臂里移动。在转台降下时卸下和装上缸套，此后启动电动机，转动垂直移动托架的变速器，托架连同转台和以最大的速度上升到缸套底面，比淬火感应器的有效圈底面高出 15 ~20mm。这时托架自动地停止上升。在判定机床和缸套装得正确无误之后，启动机床，一个缸套旋转的电动机首先动作，接着另一个电动机动作，使垂直移动托架的变速器（这种反向变速器反向转动时，其输出轴转速常是正向转动的 7 倍，利用它的正、反向解决工进慢速而返程快速）工作。这时托架缓慢地下降，其速度应符合淬火规范。下降时托架是借助其撞块作用于柱上的几个限位开关，这些开关两个用来控制加热的开始和停止，另两个控制托架停止在上下两个终点位置上。在机床前下面还装有冷却水支路调节阀门等。另外，在机床托架上装有外喷水盒，局部地包围着缸套。水流从水盒内表面孔中喷出，冷却缸套外表面，以保证缸套加热表面的散热。

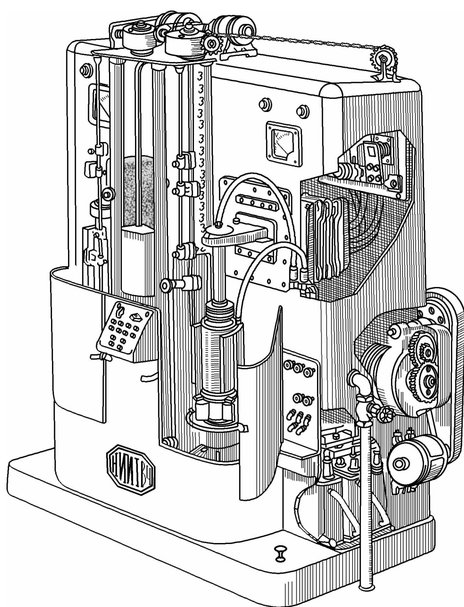


图 8-24　双工位气缸套淬火机床

269. 三工位工频气缸套回火机床是怎样工作的？

这台机床主要由装有三个工频感应器的升降床柜与装有六个下铁心的回转工作台组成，如图 8-25 所示。床柜的升降由液压缸控制，回转工作台以 180°正反转动，由带齿条的液压缸活塞杆操纵。回转工作台的外圆是一个齿圈，它与活塞杆上的齿条相啮合。待回火的三个气缸套分别放到外侧的三个下铁心上，扳动气阀手柄，液压缸活塞杆使回转工作台转 180°到内侧位置，升降床柜下降，三个工频感应器连同上铁心套住缸套开始加热。此时，外侧三个下铁心可以装上待回火的气缸套。一旦定时加热结束后，床柜自动升起，回转工作台反向转动 180°，回过火的缸套转到外侧，待回火的缸套转入床柜下方，进行下一轮的循环。

这台三工位工频气缸套回火机床所需功率为 45kW，适合加工外径为 80 ~145mm，高度为 200 ~300mm 的缸套，生产率为 160 ~180 个/h，其生产能力可为

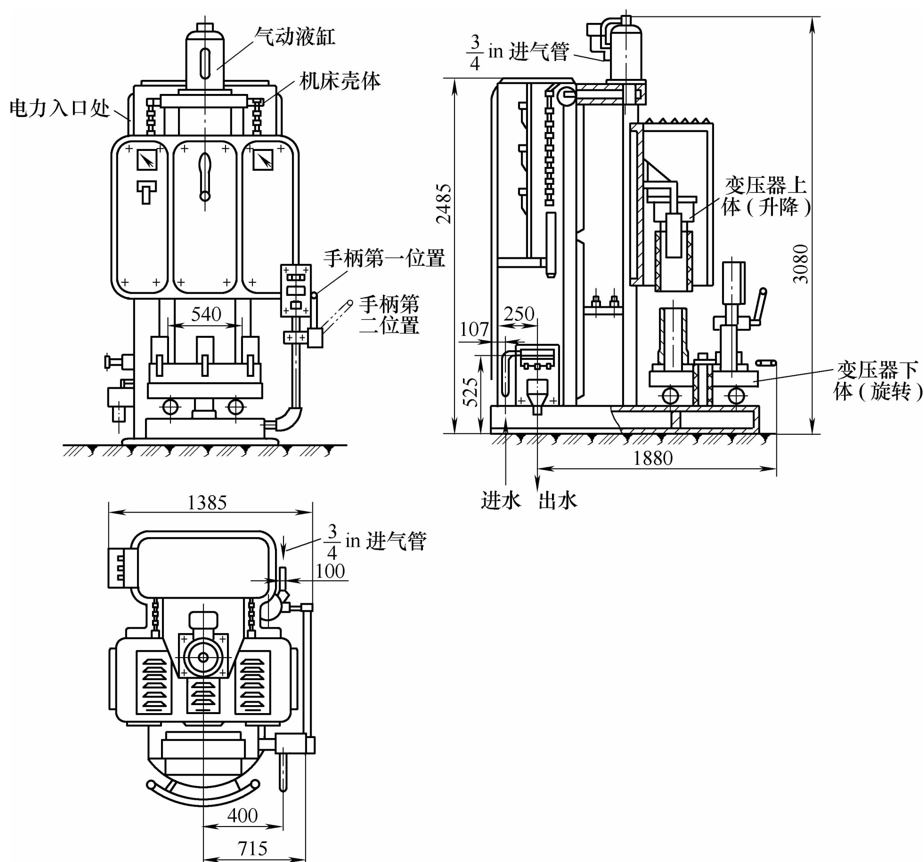


图 8-25　三工位工频气缸套回火机床

两台双工位气缸套淬火机床服务。

270. 全自动半轴淬火机床是怎样工作的？

全自动半轴淬火机床采用矩形管感应器，涡流沿轴的轴线方向流过工件表面。轴在淬火后是笔直的，因此不再需要校直。图 8-26 所示为一台全自动半轴淬火机床，其生产率为 300 根/h。该淬火机床有三个位置：进料、加热、冷却和卸料。从图 8-26 中可见，一个自动送料装置把半轴送到进料位置 1，当半轴进到传动顶尖 2 中时，它在整个过程时间内受到校正滚轮的抑制。传动顶尖 2 在进料位置时夹紧，而在卸料位置时松开。机床每个循环分度为 120°，所有动作均通过凸轮与连杆相结合。感应器是装在淬火变压器上的，这个组件通过一个支点进行旋转动作，使感应器抬起或降落下来。1 号半轴在 1 工位加热过程结束时，感应器自动抬起，机床进行分度动作；1 号半轴进入 2 工位进行淬火，随后感应器 6 立即下降到 1 工位加热位置，2 号半轴的加热过程开始，机床分度动作极快，小于 2s；此时，已加热的

1号半轴已转到2工位，在水下进行喷液淬火，而1工位则加热2号半轴，3号半轴则正进入3工位进行装料；在2号半轴加热结束之前，1号半轴在2工位因顶尖松开而移动到输送带，输送带将1号半轴自动送到回火炉。

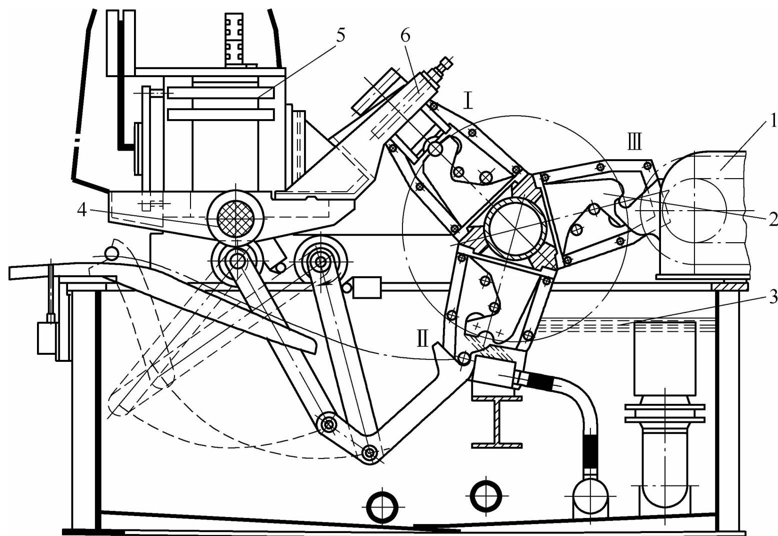


图8-26　全自动半轴淬火机床

1—进料位置　2—传动顶尖　3—淬火液槽　4—变压器组旋转支点　5—淬火变压器　6—感应器　Ⅰ—1工位　Ⅱ—2工位　Ⅲ—3工位

271. 卧式履带销自动淬火机床是怎样工作的？

履带销是细长类零件，每台拖拉机或工程机械上件数很多，因此一般采用自动淬火机床和扫描淬火工艺。图8-27所示为卧式履带销淬火机床。它由装料斗、传动机构、磁性送料轮、卸料槽等组成。履带销两端一般有一段非淬硬区，以插入开口销及垫圈。为此，设有限位开关，在一段短的端头区停止加热，履带销从装料箱可自动地每次落下一根，进入磁性滚轮送料轮。装料箱内有-根齿轴2不停地转动，使箱内多层堆起的销子不断地振动，以防止销子塞住料斗下落口。销子是在V形滚轮上作轴向前进的，V形滚轮内有圆柱形永久磁铁，它保证滚轮在旋转运动时，将销子吸住，不产生滑动。因此，销子的移动速度，取决于V形滚轮与销子接触点的直径与滚轮的转速。例如，滚轮接触点的直径为75mm，销子送料速度为23mm/s，据此，可推算出所选用电机减速器与变速齿轮的变速比。这种传送滚轮上的销子是不转动的，当销子脱离最后一个滚轮进入卸料槽时，压紧弹簧滚轮11的压轮会抬起，给出一个信号，电磁气阀动作，斜道上自动落下一根销子到滚轮上，右边每卸下一根淬过火的销子，左边也落下一根未淬火的销子到滚轮上。这种机床用100kW，8kHz中频电源，淬火ϕ22mm×430mm销子，其产量达到180件/h

以上，操作工只需往料斗中添加销子即可。

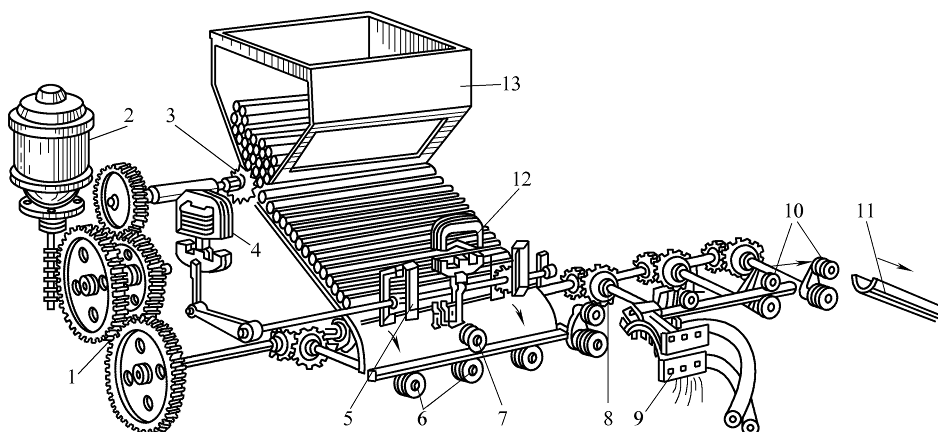


图 8-27　卧式履带销淬火机床

1—传动齿轮　2—齿轴 3 和滚轮 6 的传动电动机　3—防止销子塞住料斗口的搅动齿轴　4—控制下料机构的电磁铁　5—一次只放过一根销子的送料机构　6—主动滚轮　7—压紧轮　8—传动锥齿轮　9—感应器　10—压紧弹簧滚轮（保证销子运动不滑退）　11—卸料槽　12—电磁铁　13—装料斗

272. 链轨节一次加热淬火机床是怎样工作的？

链轨节是工程机械、履带战车、履带拖拉机上的主要零件。其工作面与地面接触，要求耐磨，且数量多。因此，链轨节淬火机床的生产率与自动化程度成为重要指标。

链轨节一次加热淬火机床由步进链和装在机架后部链条上方的淬火变压器等组成，如图 8-28 所示。感应器接在淬火变压器的二次绕组上，淬火变压器可以上下、

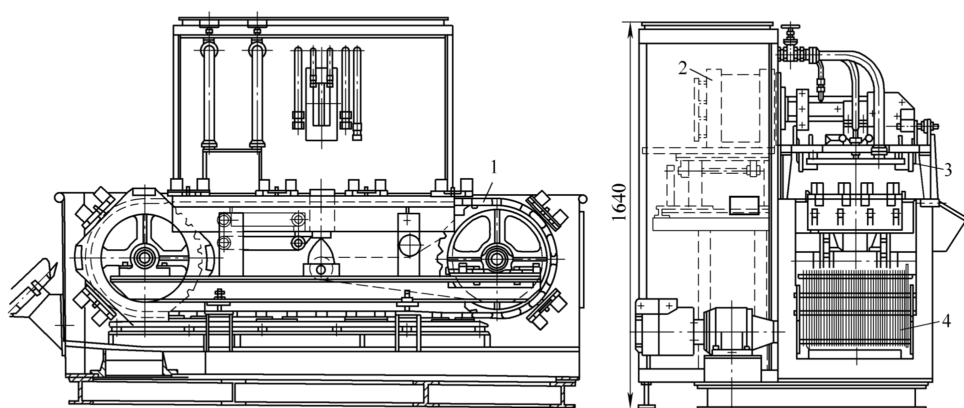


图 8-28　链轨节一次加热淬火机床

1—步进链　2—淬火变压器　3—感应器　4—出料槽

左右调整，以适应不同类型链轨节与感应器的相对位置。感应器后面有一个大型喷水器（见图 8-29），加热后的链轨节在其下部进行淬火，步进链 1 共有 14 节，每次都有 4 节处于上部，呈水平状态，其中最前面的 1、2 节用以装料，第 3 节加热，第 4 节淬火。步进链由一个十字轮装置进行步进式控制，每块链板上装有机械夹紧机构，最多能夹 4 块链轨节。当更换另一品种链轨节时，只需更换 14 块压板与相应的锁销。链轨节的支架用一个螺栓固定在链板上，喷水器的后面有一个开关机构，能把夹具打开，淬过火的链轨节滑入卸料槽中，然后进入回火工序，一般在低温电炉中回火，消除残留应力，并能提高耐磨性。

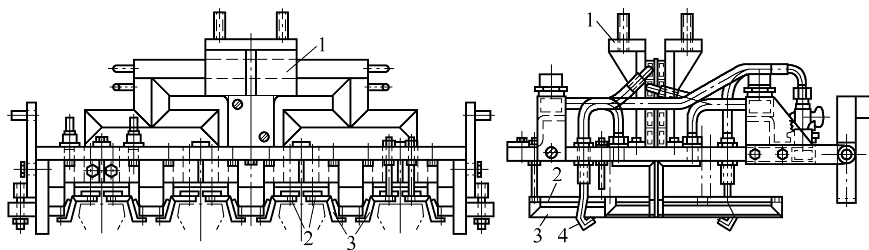


图 8-29　链轨节一次加热感应器

1—馈电头　2—主面有效圈　3—侧面有效圈　4—喷水器

在上述淬火过程中，链轨节表面加热不是很均匀。为了获得较深的淬硬层，使链轨节边棱部分不过热，装置为每个链轨节设计了两股水流，喷到链轨节不需淬火的部分，使边棱不过热。这种淬火机床，对小链轨节一次加热 4 件（2 左、2 右），大链轨节一次加热 2 件（1 左、1 右），用一次淬火法加热链轨节过程中，中频电源是不断开的，因此生产率较高。

273. 链轨节扫描加热淬火机床是怎样工作的？

链轨节扫描加热淬火机床，不仅用于感应淬火加热，也可用于感应回火加热。

图 8-30 所示为一种链轨节扫描加热淬火机床，它由机架和一条用非磁性钢带组成的环形传送带等组成。传送带由滚轮支撑着，因为感应器通电时有吸力，可将链轨节吸起，滚轮间装有五块

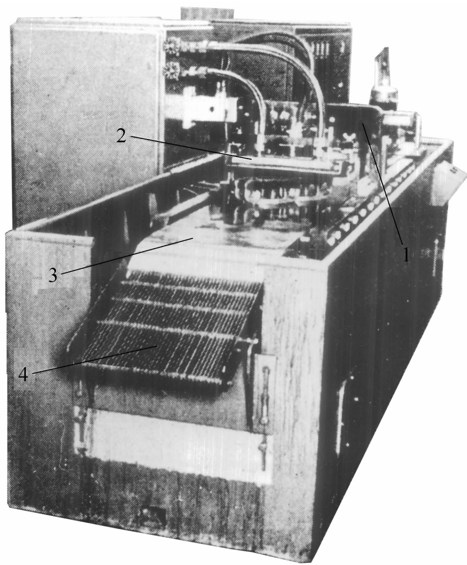


图 8-30　链轨节扫描加热淬火机床

1—感应器　2—喷液器　3—输送带　4—卸料槽

直流电磁铁，阻止了链轨节被吸引。链轨节按要求放到传送带上，调整感应器及其后面的喷水器的高度，即可进行另一种链轨节的生产。变压器安放在机架上，感应器的馈电头与变压器二次绕组相连，感应器后面安装了喷水器。链轨节放置在传送带上，传送带的进给速度由无级调速的直流电动机控制，链轨节从感应器下面通过，并进行加热、淬火。早期的链轨节淬火后，送到低温回火炉进行回火。现代的淬火机床，已采用了感应回火工艺，其回火方式也为扫描式。为保证回火时间，可设置为二段回火，回火的目的是消除应力并能提高耐磨性。由于链轨节有左右之分，现代回火感应器亦根据要求，分左式及右式感应器。扫描淬火法的缺点是不易得到深的淬硬层，且链轨节边棱部分易过热，因此，需喷水或水汽混合物。

274. 驱动轮淬火机床是怎样工作的？

驱动轮因为结构特殊，只能在专用淬火机床上进行加热与淬火，但其淬火机床并不复杂。其特点为：一般是单个齿槽或多个齿槽进行加热淬火；加热时，为使齿槽沿宽度方向温度均匀，淬火变压器感应器组需左右摆动。图 8-31 所示为驱动轮淬火机床的主要部分。当驱动轮是铸件时，可以整个装上；当驱动轮是由轮毂和齿圈块组成时，也可以将齿圈块装在辅助夹具上进行加热淬火，然后再装到轮毂上。淬火变压器与感应器是装在可以上下升降、前后能摆动的托架上的。当驱动轮齿槽调整到规定位置时，定位机构与淬火变压器感应器组向齿槽方向前进，感应器头进

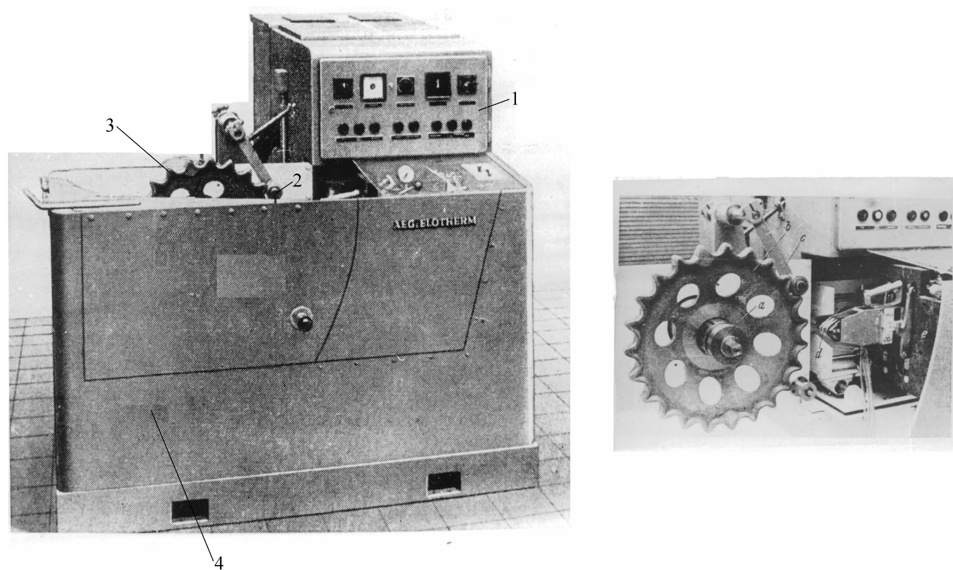


图 8-31　驱动轮淬火机床的主要部分

1—测量和操作部件　2—分度装置　3—驱动轮　4—淬火槽

入齿槽，开始加热，同时托架往复摆动；一个齿槽加热到温后，托架后移，分度机构进行分度，感应器再前移，在感应器下面的喷液器进行喷液淬火，第二个齿槽则开始进行加热，如此循环。驱动轮专用淬火机床也有立式的设计，一次可加热所有齿槽，摆动变为上、下动作。

275. 导向轮淬火机床是怎样工作的？

导向轮和驱动轮淬火机的区别在于前者是扫描淬火，而后者则是一次加热淬火。图8-32所示为导向轮淬火机床的主要部分。导向轮淬火机床一般可与驱动轮淬火机床通用，只是在工件定位转轴上安装了一套回转装置，能够使定位转轴进行无级变速。导向轮淬火加热时，左右两个轮面与肩部是同时进行的，感应器有效圈下面有喷液器。导向轮扫描淬火到最后，必然有一个重复加热的过渡区。为了减少此过渡区的长度，感应器有效部分宽度不能设计得太宽；为了不使过渡带产生在一个直的区段上，感应器有效圈布置在两个轮缘上时，应前后分开一段距离。

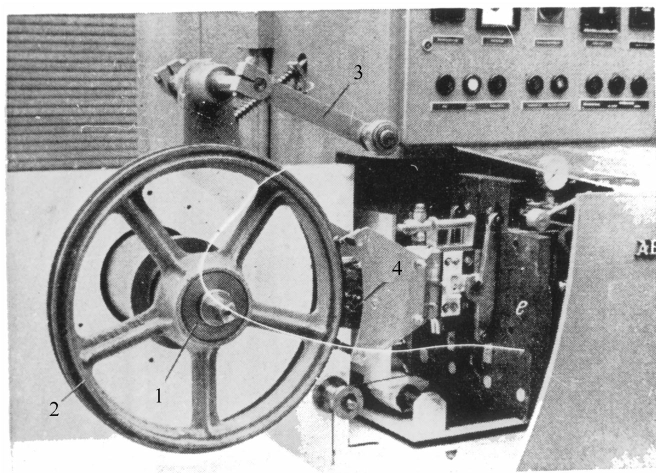


图8-32　导向轮淬火机床的主要部分

1—工件支座　2—导向轮　3—分度装置（已移开）　4—双回线感应器

276. 什么是埋液淬火机床？

埋液淬火机床即在油层下加热淬火的机床。工件的淬火部位与感应器均埋浸在油中，其目的是使工件在油中加热，并使周围的油作淬火冷却介质，当加热结束后，利用周围的油来冷却加热层。由于这种淬火冷却介质的淬冷烈度较弱，因此适合于处理减少畸变及防止开裂的工件。为此，工艺上要符合两个条件：加热功率密度必须足够大，使工件表面在静止液体环绕条件下能快速升温到所需淬火温度；此液体的淬冷烈度要低，不阻挡工件快速升温。图8-33所示为油层下进行轴类扫描淬火的机床。

277. 气门端头淬火装置是怎样的？

发动机的进、排气阀顶端与气门摇臂头相接触，容易磨损，为此要求淬硬，一般要求 >40HRC。进气门与排气门材料不同，加热温度与冷却速度也不相同。

1）简易的气门淬火装置如图 8-34 所示。高频电源供电给一个三匝的螺旋形感应器，中间一匝比两端的匝直径略小，在感应器中心线的两端各放置一个气门，气门杆端位于感应器的中心，由于杆径只有 8mm 左右，因此，感应器通电后，两个杆端同时加热到淬火温度。两个 V 形块既能定中心，又能定轴向位置。用 6kW 高频电源加热两个气门的时间为 3s，气门达到规定温度后，投入下面的淬火槽中，淬火冷却介质一般用油。由于气门生产量大，因此，气门自动淬火装置便成为十分必要的淬火装置。

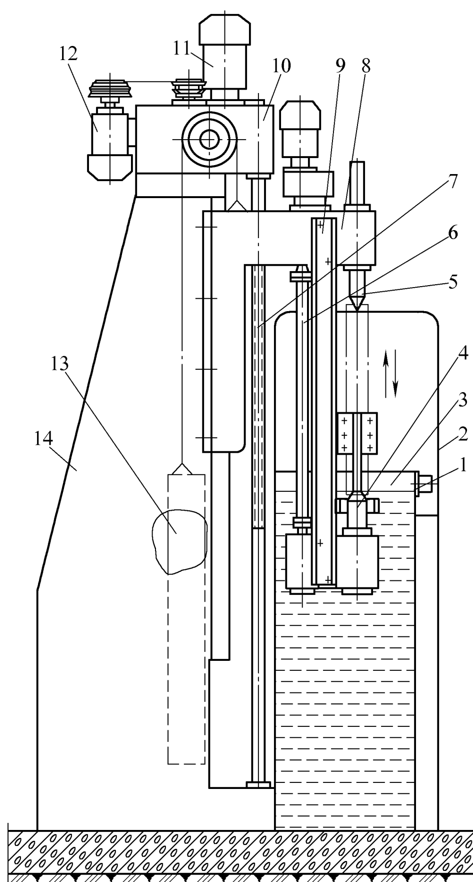


图 8-33　油层下进行轴类扫描淬火的机床
1—感应器　2—淬火变压器箱　3—油槽　4—下顶尖　5—上顶尖　6—下顶尖传动轴　7—空行程丝杠　8—托架　9—支柱　10—变速器　11—空行程电动机　12—工作行程电动机　13—平衡重物　14—床身

2）气门端头自动淬火装置如图 8-35 所示。采用 IGBT 超音频晶体管电源，80kHz、9kW，回转工作台由主传动电动机控制，径向定位亦由电动机控制，轴向定位由电磁铁操控。加热时间可根据工艺需要在 0.1 ~ 9.95s 内调整，工作节拍为加热时间 0.7s。这台机床采用计算机控制，具有零件进、加热、退出、冷却、送出等功能，可设定工艺参数，并有显示、记录、打印等功能。

278. 双工位驱动轴淬火机床是怎样工作的？

驱动轴有两个淬火部位，即法兰杆及花键。由于产量大，驱动轴中频感应淬火机床安装在生产线上。淬火机床为卧式双工位，采用半环形感应器，便于工件进、出料。图 8-36 为双工位驱动轴淬火机床主要结构。主要结构为两台中频变压器、两个半环型感应器、主轴箱、尾架、步进链及托起机构，中频电源是 100kW、

10kHz。两台中频变压器交替工作，左位置加热驱动轴的法兰及杆部，右位置加热花键部位。两个半环感应器能毫无阻碍地使托起机构上的驱动轴进入感应器。淬火变压器连同感应器能够转角度升降（以中频变压器一侧为支点，进行反时针向后转动的圆弧动作），在下降位置感应器正好包住工件，进行加热；上升位置则是喷液器针对着加热工件进行淬火。驱动轴中频感应淬火过程

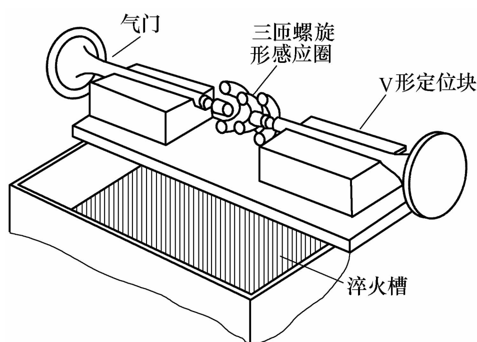


图 8-34 简易的气门淬火装置



图 8-35 气门端头自动淬火装置（银川高周波机器制造有限公司）

如下：托起机构V形槽将步进链上的驱动轴上托到位；尾架顶尖动作，将工件顶紧，主轴带动工件回转，左变压器先接通电源，工件法兰及杆部加热，到规定温度后断电；左变压器升起，感应器上的喷液器开始喷液；与此同时，右变压器开始接通电源，加热花键部分，到规定温度后断电；右变压器升起，感应器上的喷液器开始

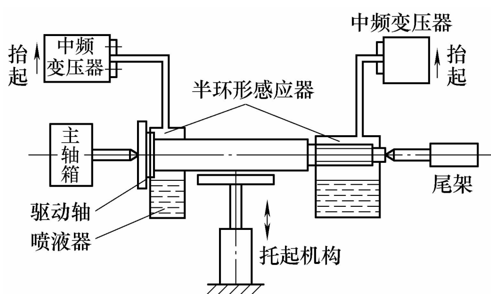


图 8-36 双工位驱动轴淬火机床主要结构

喷液；花键部分开始淬火；随后，托起机构的V形槽上升，尾架顶尖松开，驱动轴随V形槽下落到步进链上；步进链动作，前进一步，下一个驱动轴进入V形槽

上面位置，驱动轴再升起，如此循环。

在生产线上的驱动轴用控制喷液时间的方法进行自回火。由于下一工序还需机加工磨削，在步进链动作 4 次后，驱动轴经过第二次冷却到室温。

279. 盘形薄件淬火机床是怎样工作的?

图 8-37 所示为是一台盘形薄件淬火机床。该淬火机床采用高频电源、盘香型感应器。工件可转或不转动，淬火机构是气动升降，工件加热后取下，浸入淬火冷却介质中淬火。为提高生产率，电源有双输出交替工作功能。

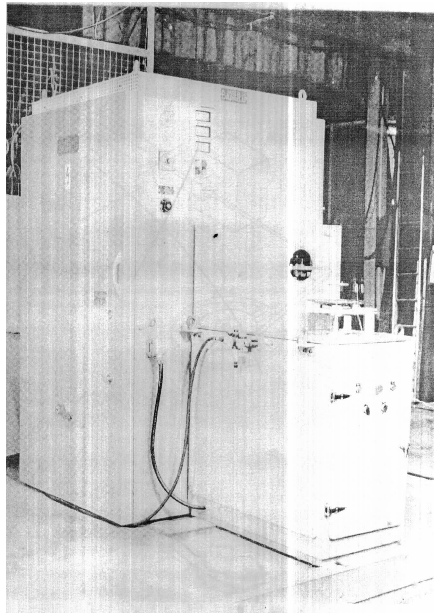


图 8-37　盘形薄件淬火机床

280. 螺钉头全自动感应淬火机床是如何工作的?

螺钉头全自动感应淬火机床如图 8-38 所示。该淬火机床是发动机调整螺钉头部感应淬火的专用全自动淬火机床，上料、加热、喷水和下料全部自动进行。加热方式是周期性一次加热，每次可加热 12 个零件。工件回转半径为 412.5mm，分度速度为 5 ~ 50r/min，按 8 等分为 1.5 ~ 0.016s/等分。该淬火机床适用于大批量生产，手动操作时可进行小批量生产。

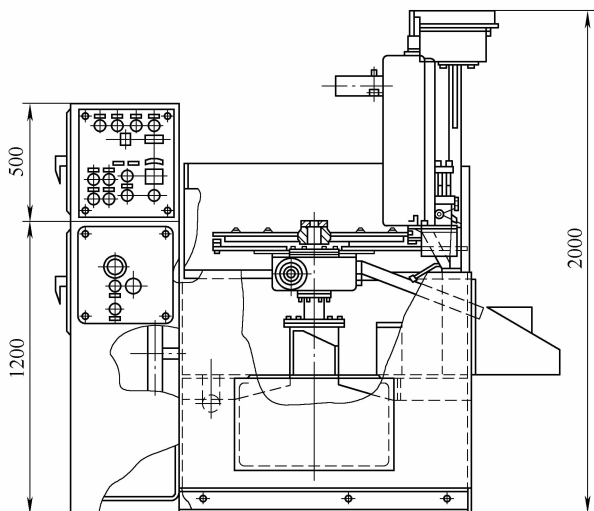


图 8-38　螺钉头全自动感应淬火机床

281. 滚珠丝杠淬火机床有哪些特点?

滚珠丝杠感应淬火机床一般为卧式结构，因为丝杠长达 5 ~ 6m，如果采用立式，即使采用变压器与感应器移动，其操作还是十分不便的。图 8-39 所示为一台卧式滚珠丝杠淬火机床的主要工作过程。这台滚珠丝杠感应淬火机床采用晶闸管中频电源，有两档功率与频率，即 160kW/10kHz 与 50kW/30kHz。前者是用于直径较粗的丝杠，后者用于直径较细的丝杠，工件最长为 6m。

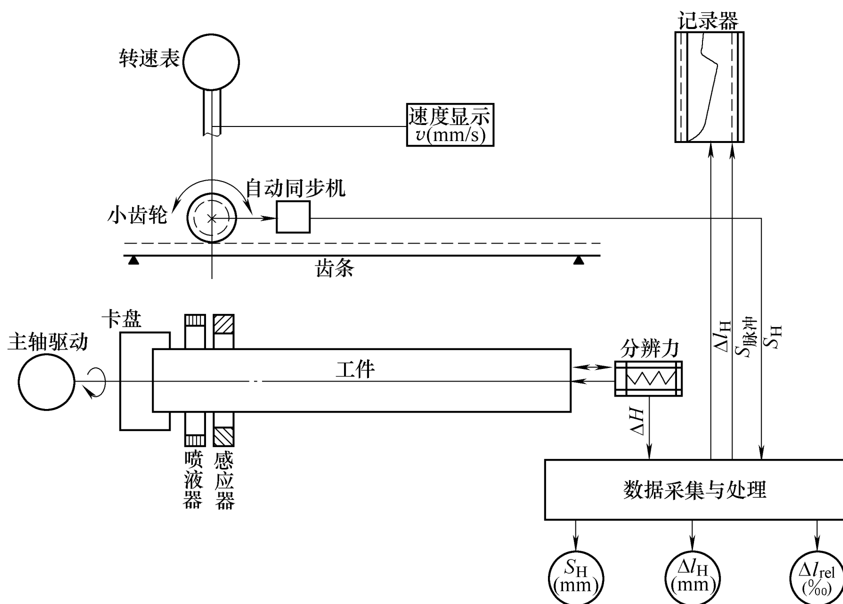


图 8-39 卧式滚珠丝杠感应淬火机床的主要工作过程

滚珠丝杠感应淬火的关键技术是控制它的变形。变形有两个方面：首先是弯曲变形，这是细长工件都要碰到的问题；其次是伸长变形，对滚珠丝杠来说，就是它的螺距的伸长与缩短。如果淬火后螺距伸长太多，随着丝杠长度的增加，累积伸长量超过一定值，螺距尺寸超过公差，丝杠就会报废。

这台机床设计上采取了一些措施：①采用半环感应器，它的电流除周向电流外，还有纵向部分，使螺纹顶与底均能加热；②通过间隔定位块跨在丝杠上进行扫描淬火，由于定位块紧跨在丝杠上，保持了等间隙，丝杠又是转动着加热，可使加热均匀；③安装了支承丝杠的限变形滚子，减少了弯曲变形。

这台机床的特点是可进行长度修正。滚珠丝杠的回火也在这台机床上进行，利用回程进行回火。回火后在机床上再一次进行冷却，从而完成了热处理工序。这台机床的计算机连接打印机，打印出每根淬火件的测量结果，此报告可作质量记录卡用。滚珠丝杠感应淬火机床的电源现在又发展为三种频率，对不同直径的丝杠可有更恰当的选择。

282. 锭杆感应淬火机床是怎样工作的?

锭杆是纺织机械专件锭子上的重要零件。HWG 公司生产的卧式淬火机床，适用于直径为 8 ~ 30mm、长度为 50 ~ 400mm 的细长零件。电源有两种频率，淬火加热用 400kHz，回火用 200kHz。淬火机床由储料仓、送料机构及一对同向旋转的辊子组成。淬火、回火感应器放置在两套辊子之间，推料机构由 D. C 伺服电动机驱动，两个固定速度 20mm/s 和 200mm/s，三个无级调整速度（2 ~ 200mm/s）和两个限时装置，通过设定可控制工件的进给速度和停留时间。淬火、回火是同步进行的，整个加工过程由程序编制和无触点开关控制，淬火、回火连续、自动地一次性完成。

283. 冷轧辊双频感应淬火机床是怎样工作的?

图 8-40 所示为冷轧辊双频感应淬火机床。双频电源为工频 50Hz、1000kW 与中频 250Hz、750kW，由 10kV 供电系统分两路供电，每路均由降压变压器降至需要电压。图 8-41 所示为双频供电系统示意图。

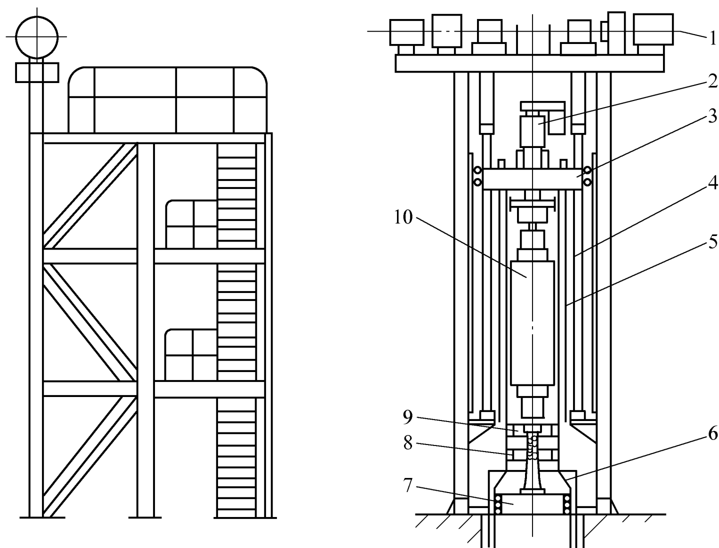


图 8-40　冷轧辊双频感应淬火机床

1—传动部分　2—旋转电动机及润滑系统　3—上横梁　4—丝杠　5—光杠
6—喷水器　7—下横梁　8—中频感应器　9—工频感应器　10—轧辊

由图 8-40 可知，这台机床顶部装有传动部分 1，包括电动机与减速器。上、下两根横梁 3 与 7 由丝杠 4 带动，可以上下升降。工件夹紧由光杠 5 来操纵横梁，工频感应器 9 位于上面，预热轧辊，中频感应器 8 位于下面，进行最后加热，喷水器 6 位于最下面。工作过程为托架慢速下降，由一台带速度反馈调压调速的 DC 电动机驱动，在 0.3 ~ 1.5mm/s 范围内可无级调整，托架快速升降则由另一台交流电动机来完成，速度为 15mm/s。冷轧辊转速有两档：30r/min 用于直径较小的冷轧辊，

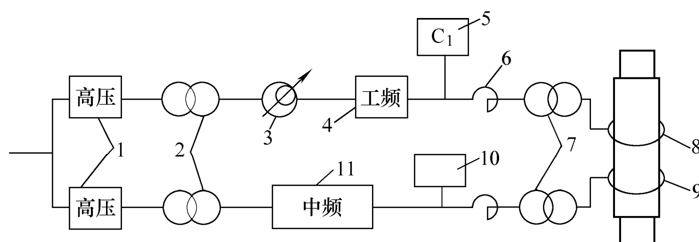


图 8-41　双频供电系统示意图

1—高压柜　2—降压变压器　3—调压器　4—工频电源柜　5、10—补偿电容
6—串联可调电抗器　7—淬火变压器　8—工频感应器
9—中频感应器　11—中频电源

15r/min 用于直径较大的冷轧辊。

因为冷轧辊直径大，加热深度深，因此淬火水系统的水泵流量特别大，可达 $350m^3/h$。

采用红外双色测温装置，使冷轧辊加热温度自动显示，功率、温度闭环全自动控制。这种冷轧辊双频感应淬火机床已在国内多家钢厂生产上使用，并在生产过程中进行了改进。冷轧辊用 86CrMoV7 材料制造时，冷轧辊淬硬深度可达 15 ~ 17mm。

284. 大直径冠齿轮一次加热淬火机床是怎样工作的？

意大利 SiAtem 公司为德国罗德艾德公司制造了一台大直径冠齿轮淬火机床，所处理的齿轮直径为 500 ~ 1600mm，模数为 6 ~ 14mm，淬硬深度为齿轮根圆下 2 ~ 3mm。冠齿轮加热及淬火装置如图 8-42 所示。

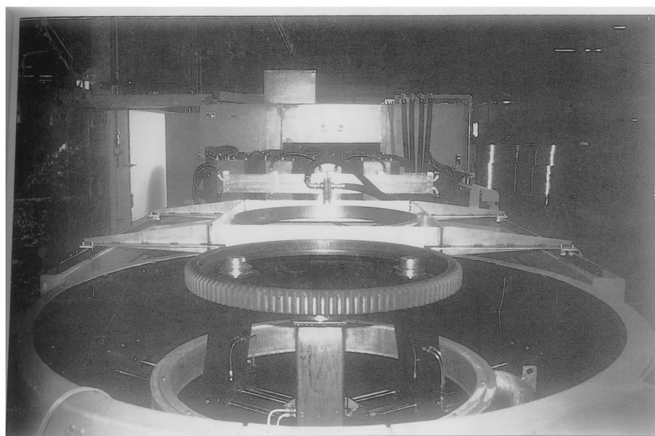


图 8-42　冠齿轮加热及淬火装置

固态电源具有两档频率与功率，即 1600kW/4kHz 与 1200kW/8kHz。齿轮加热频率的选择根据模数而定。大齿轮加热后，落入流量为 8000L/min 的淬火喷液中，淬火液中含有添加剂。齿轮淬火后，再回到加热位置，进行消除应力的回火。典型

的生产能力，以直径 1m、模数 8mm 的齿轮为例，是 10 件/h。

285. PC 钢筋热处理生产线是怎样工作的？

PC 钢筋是预应力混凝土钢筋的简称，钢筋表面具有螺纹，与混凝土能良好地附着。PC 钢筋热处理包括中频预热，高频最后加热、淬火，中频回火等过程。其热处理生产线包括压送机、加热感应圈、淬火室、回火感应圈以及矫直机、切断机等。

PC 钢筋处理生产线由于生产量大，因此考核此生产线的优劣，除产品质量外，能耗指标是一个重要方面。美国应达公司（lnducto Heat Inc.）推荐了一套用于处理建筑结构、桥墩、混凝土支柱用的预应力混凝土钢筋的感应淬火、回火系统。此系统也可用于制造其他凹螺纹钢筋、钢丝、圆钢棒。整个系统代替了用直接电阻加热作最后的加热。系统设计处理直径为 6～12mm 的钢筋，以 35m/min 移动速度进给。

系统采用一台中频电源预热，一台固态高频电源作淬火前的最后加热，另外一台中频电源作回火用。淬火前的加热温度是 940～950℃，回火温度为 400℃。系统还配有钢筋进给脱空保护，与进给速度相对应的功率控制，循环冷却水泵站和淬火冷却介质循环系统。唯一的一个控制柜把所有的主要操作功能联锁在一起。

PC 钢筋感应淬火、回火生产流程如图 8-43 所示：钢筋除黑皮→冷拔→重整→预热（居里点以下）→加热（居里点以上）→淬火→吹干→回火加热→冷却→吹干→卷捆。在卷捆筒前设有一切断机，当卷捆满盘时开动。

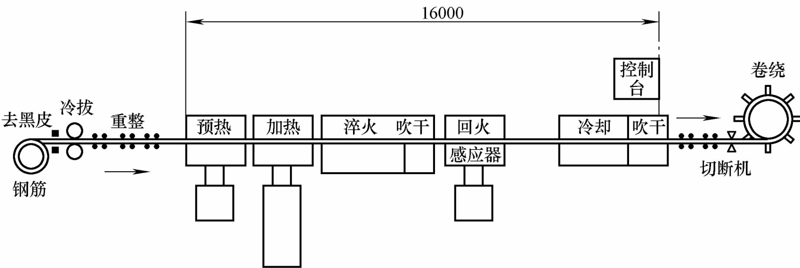


图 8-43　PC 钢筋感应淬火回火生产流程示意图

286. 国产钢筋、钢丝热处理生产线发展情况如何？

国内钢丝、钢筋热处理生产线已经历了二十多年的研制、生产与改进，从凹螺纹预应力管桩钢丝生产线开始，发展到不锈钢丝、低松弛钢丝及钢绞线、弹簧钢丝等多个品种。生产线组成由单线发展为双线；电源配置由晶闸管中频与电子管超音频相结合，发展为晶闸管中频与 IGBT 晶体管电源相组合，达到能耗降低、生产率提高的目的。表 8-5 列出了国产各种钢丝生产线的配置。

表 8-5　各种钢丝生产线的配置（天津金能电力电子有限公司资料）

序号	产品名称规　格	预热电源	最终加热电源	加热温度/℃	进给速度/(m/min)	附注
1	不锈钢丝 ϕ3 ~ ϕ13	KGPS160kW/4kHz	GGC80 ~ 2	1200	≈30	
2	低松弛钢丝及钢绞线 ϕ5 ~ ϕ18		KGPS160kW/2.5 ~ 4kHz 或 KGPS250kW/2.5 ~ 4kHz		ϕ5mm 钢丝达 120	
3	弹簧钢丝 ϕ5 ~ ϕ13	KGPS250kW/4kHz	IGBT200kW/30kHz + SIT100kW/100kHz		1t/h 产量	回火用 KGPS160kW/4kHz
4	弹簧钢丝 ϕ10 ~ ϕ17	KGPS250kW/4kHz	IGBT150kW/30kHz			回火用 KGPS160kW/4kHz
5	管桩钢丝（单线）ϕ7.1 ~ ϕ12.6	KGPS350kW/4kHz	IGBT200kW/40 ~ 50kHz		70(ϕ9mm 钢丝)	
6	管桩钢丝（双线）ϕ7 ~ ϕ10.7	KGPS250kW/4kHz 2 台	IGBT250kW/30kHz IGBT200kW/40 ~ 50kHz		60(ϕ9mm 钢丝),50 (ϕ10.7mm 钢丝)	回火用 KGPS350kW/4kHz

管桩钢丝热处理生产线，从单线生产发展为双线生产，要解决两根钢丝的负荷温度均匀问题。采用双线生产除提高生产率外，占地面积几乎和单线一样，无须扩大厂房；设备投资费与单线比，略有增大而不是翻番；经生产单位核算，每吨钢材还能节省 50kW · h 电能。因此，双线生产具有更广阔的前途。和国际上同类产品比，双线生产具有先进性。

287. 等速万向节钟形壳感应热处理生产线是怎样工作的?

等速万向节钟形壳有两个淬火部分，即柄部与内球道两部分（见图 5-23a）。

图 8-44 所示为一种等速万向节钟形壳感应热处理生产线。其工作流程为：工件清洗→内球道火、回火、杆外圆与轴肩淬火、回火→非破坏性检验（NDT）。内

滚道淬火采用 300kW、10kHz 固态电源，轴杆外圆与轴肩采用 600kW、10kHz 固态电源。两台固态电源具有独立的频率与功率，可适应多达 60 余个品种工件的需要。钟形壳从机加工输送到此生产线，经过喷洒清洗剂清洗，清水漂洗和吹干，输送到内球道淬火位置。淬火位置是三工位，有三个主轴夹紧组件，感应器位于工件下方，工件由机械手放到气动夹紧的主轴组件上，主轴组件下降，使工件精确地定位在球道感应器的上方，加热由 kW·s 能量控制器监控。三个工件内球道逐个淬火后，再逐个进行回火，所用功率较低，加热时间较长，使球道得到均匀的回火。然后，将钟形壳送到轴杆外圆加热位置，采用精确的工艺过程监控器，使用装有步进编码定位器的伺服电动机，以保证工件的精确定位。采用红外双色温控仪监控淬火温度，并使用 kW·s 能量控制器。除此以外，生产线还装有一台涡流非破坏检测仪，对每个工件的淬火硬度、深度和区域进行对比检测。将测试数据进行编程，提供作统计过程控制（SPC）资料，从而决定实际控制水平、极限偏差等。

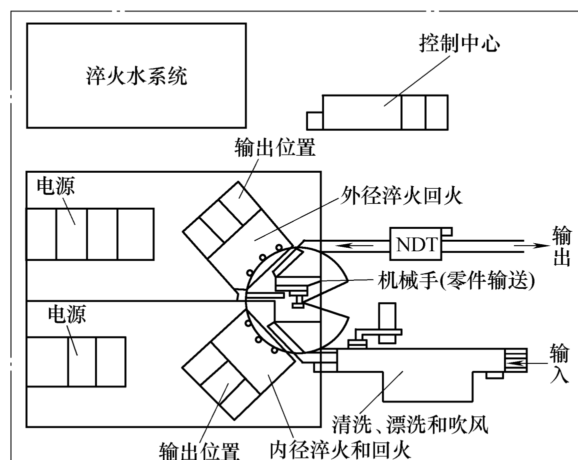


图 8-44　等速万向节钟形壳感应热处理生产线 I

另一种等速万向节钟形壳感应热处理生产线如图 8-45 所示。其工作过程是先淬内球道，冷却后再加热轴杆部，冷却后，钟形壳整体感应回火，再次冷却后，流到下一机加工工序。

288. 双频齿轮感应淬火生产线是怎样工作的？

美国 TOCCO 公司曾为一个传动器厂设计制造了一条内齿轮及太阳齿轮的双频感应淬火生产线。此生产线由两台 100kW、10kHz 中频固态电源组成，一台用于内齿轮，另一台用于太阳齿轮；高频电源为 200kW、450kHz。

（1）内齿轮的淬火与回火　此生产线内齿轮每次卸下一件，由相对而立的两个气缸操纵。当工件处于 1 号装料位置，一个接近开关动作，使气动往复杆推工件到淬火工位，此工位有一个可变速度的伺服及垂直扫描的托架，齿轮到达淬火工

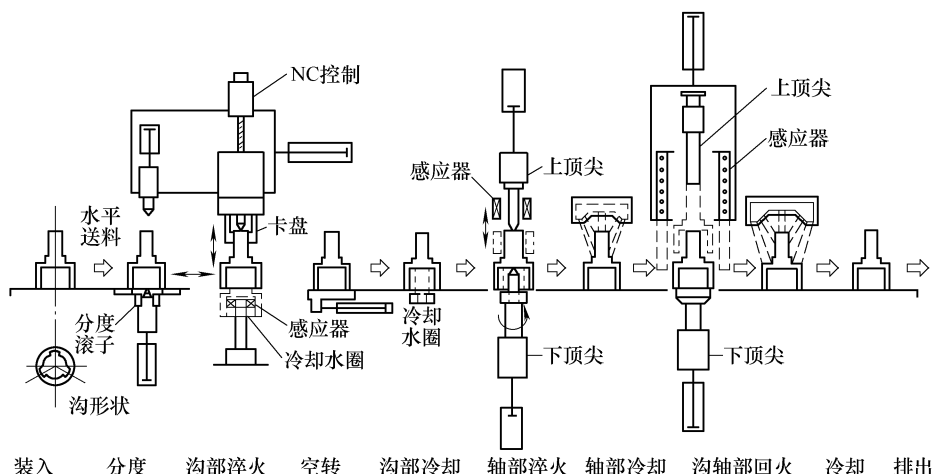


图 8-45　等速万向节钟形壳感应热处理生产线 Ⅱ

位，另一个接近开关动作，于是，立式扫描器将内齿轮从往复杆上托起，并把工件放到感应器下面的定向位置，有两个接近开关用作专用的定位指示，如果定错位置，工件即回到往复杆，以便再次装料。错位 1s，机床即停止运转，与此同时，一个诊断显示屏幕指示出工件不在淬火工位。如果内齿轮定位正确，为工件定向工位所接受，扫描机构将把它送入感应器。一旦感应器位于内齿轮中，中频电源开始进行加热，工件旋转，同时扫描机构使工件下降，使感应器扫描并预热内齿轮的全长。内齿轮中频预热、高频扫描淬火示意图如图 8-46 所示。

中频预热完成后，扫描定位器上升，回到原来位置，电源转换开关转接到高频电源，工件再次旋转下降，将预热过的齿轮，用高频进行扫描并淬火。淬火后的内齿轮下降到往复杆后，往复杆推工件到回火工位，其定位信号动作与淬火工位相同。回火是一次加热方式，回火时工件是旋转着的，回火功率较小，是在齿轮高频淬火的间段时间进行的。

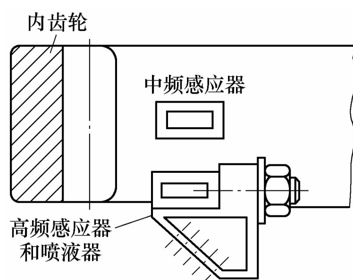


图 8-46　内齿轮中频预热、高频扫描淬火示意图

回火工序完成后，齿轮降到往复杆上，推向冷却工位，由喷淋头冷到装卸温度，然后工件被推向分检工位（合格或剔出）。剔出是由许多检测装置所确定的，如果内齿轮被确定剔出，则装在侧面的一个气动卸料杆将水平地将该齿轮推动，并滑到剔出卸料箱，如果齿轮合格则推到出料箱。

（2）太阳齿轮的淬火与回火　太阳齿轮双频淬火示意图见图 8-47。

中频预热及高频加热时，工件均是旋转的，高频加热后，淬火液从组合式感应

器中喷液。由于太阳齿轮的结构特点，在它进入回火工位前，必须将附存的淬火液清除掉。有一个工件轻抖动工位将太阳轮托起呈 110°角度，并进行抖动，将附存的淬火液排除。回火工序使用中频，正好是高频加热此齿轮的时间阶段。回火时，工件亦转动着，回火后的齿轮进入冷却工位，喷淋冷却后，再次轻抖动，除水后进入检验工位，进行合格及剔除分选。

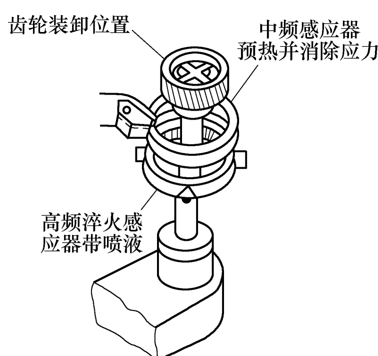


图 8-47 太阳齿轮双频淬火示意图

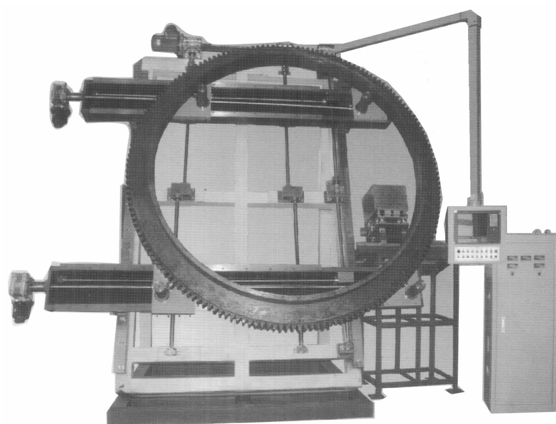
（3）检测仪表及其控制 扫描速度、加热周期和淬火冷却由程控器（Modicon 984）控制，还有输入及输出卡片、程序设计器（480 Gould）、伺服控制器（410 Gould）、D. C. 电动机控制器用以控制工件回转速度。伺服控制器用以控制扫描速度，故障诊断屏幕显示故障，能量监控器提供真实能量。淬火、回火感应器上均有接地保护，如果工件与感应器相碰，故障会在屏幕显示，机床会停止工作。

（4）水冷系统 由不锈钢水泵、板式换热器、浮子式开关、水温监测器、自动调温阀等组成。

289. 大回转支承滚道淬火机床的结构是什么样的？

传统的轴承内外滚道由于滚道直径大，其感应淬火常用 4～30kHz 变频器扫描淬火，在淬火起点与终点之间一般留有 30mm 左右的过渡带（软带）。

早期的回转支承滚道淬火机床常与大齿轮淬火机床通用，既能淬单齿又能扫描淬滚道，一般与立式车床相似，齿轮是水平放置的。其后改进成倾斜 75°式，便于操作及淬火液流走，如图 8-48 所示。


图 8-48 倾斜式大回转支承滚道淬火机床

为了既便于齿轮单齿淬火，又适用于滚道淬火，德国某感应加热公司研制了既能斜装淬滚道，又能水平装齿轮的 RHM-5 型的淬火机床，工件直径可达 6m，重可达 20t。

近年来，随着风电行业的发展，回转支承滚道无软带扫描淬火再次成为感应加热公司的重点研发项目。早在 20 世纪 50 年代，前苏联对巨型轴承圈即提出采用两

个感应器从起点各向相反方向扫描，最后两个感应器汇合，在汇合点由喷液器进行喷液淬火的方法来解决软带问题，如图8-49所示。

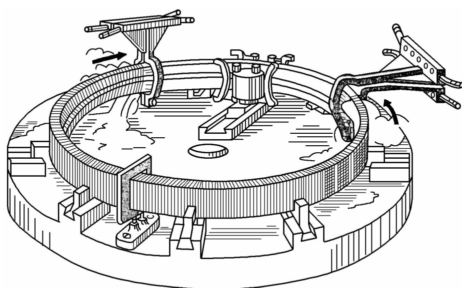


图8-49　巨型轴承圈用双感应器感应淬火示意图

现在国内外已研发出一种新型的回转支承滚道淬火机床，它可以使淬硬层首尾相连，没有软带，其机理与图8-49相似。两个感应器从起点各向相反方向扫描，最后两个感应器汇合，在汇合点由喷液器进行喷液淬火，但在机床设计上，十分巧妙，如图8-50所示。它像一台梁式吊车上挂着两套负载系统，感应器能上下左右，吊车能前后移动，这样组成一个三维的运动空间，因此，能处理不同直径与高度的滚道。

对较小直径滚道的淬火，还有一种淬火机它使工件高速旋转，用一个以上的感应器进行加热，当滚道表面全部达到淬火温度后，一次同时喷液，这样也能得到无软带的淬硬层。

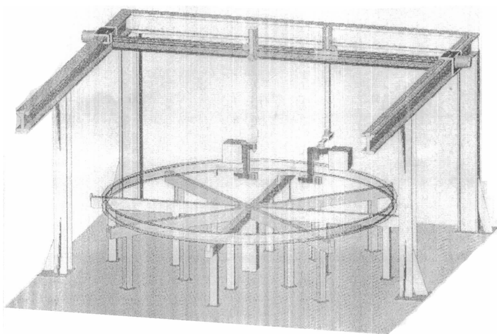


图8-50　新型的回转支承滚道无软带淬火机床

290. 什么是在线净功率监控器?

工件净功率监控器是德国SMS-Elotherm公司的一项专利技术。它在淬硬过程中用于在线对滚道淬硬层质量进行实时监控，当感应器与工件的间隙由于畸变而产生变化时，此监控器能精确地反映加热工件上的功率变化。监控器反映的功率变化与常规振荡回路上测量出的功率变化不同，它过滤掉了杂散的功率损耗，所以称为净功率监控器。图8-51所示为净功率控器与振荡回路监控的对比曲线。

当间隙变动0.2~0.4mm时，振荡回路监控曲线变动不明显，而净功率监控器监控的曲线就像放大镜那样，变得清晰可见。有了净功率监控器，感应器与工件因间隙变动而导致功率产生的微小变化均可显示出来，配合感应器自动定位。

291. 什么是无触点感应器自动定位控制?

无触点感应器自动定位控制是德国SMS-Elotherm公司的又一专利技术，如图8-52所示。

从图8-52可看到，中央及右侧有两根传感器的进线，它们各控制齿槽及齿右侧的间隙，特点是无触点控制。它在淬硬过程中实时传感并校正感应器的定位误

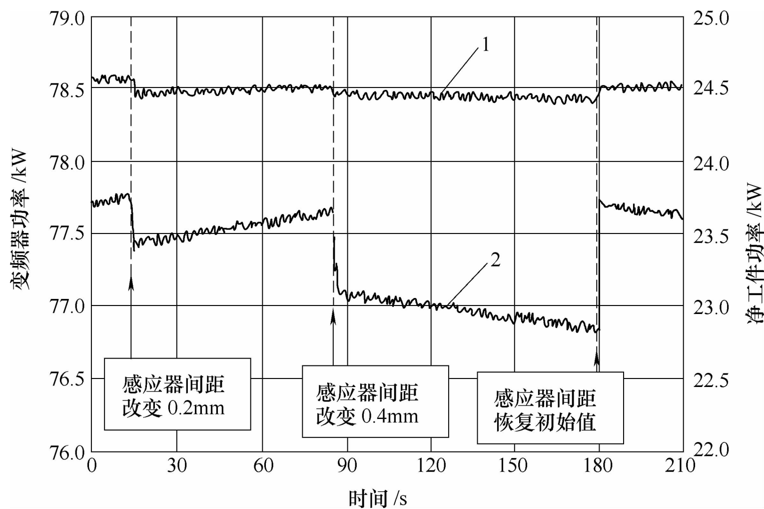


图 8-51　净功率监控器与振荡回路监控的对比曲线

1—振荡回路监控曲线　2—净功率监控器监控的曲线

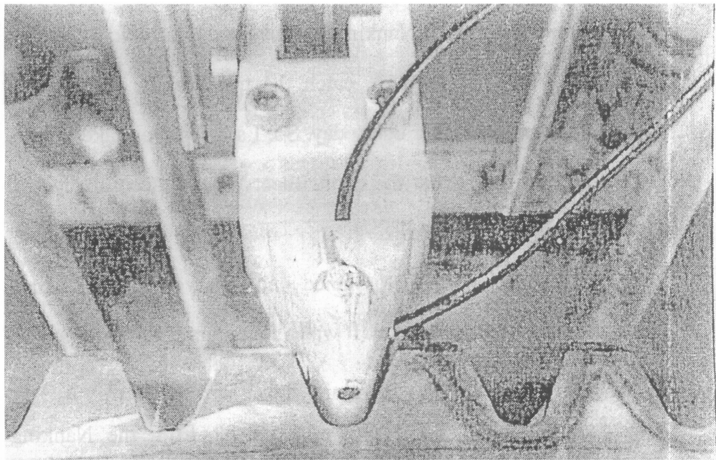


图 8-52　无触点感应器自动定位控制

差，与此同时，工件净功率监控器提供在线的连续的质量监控。两项专利技术的结合得到一致的和良好重现性的淬硬层，使大滚柱、滚珠轴承具有更高的承载能力和较长的服役寿命。

292. 什么是功率切换器？

当一台感应加热电源供给多个淬火机床或淬火台时，需要功率切换器。通过控制电路它们是互锁的，不会同时接通。其主电路触头相当于刀闸，由气动或电动元件执行开断。这种切换器一般无灭弧罩，因此，只能在断电状态下进行切换。它的体积较小，和 20 世纪 60 年代应用的中频接触器相比小许多。现在国产功率切换器

有两台式功率切换器与三台式功率切换器。图 8-53 所示为两台式功率切换器。

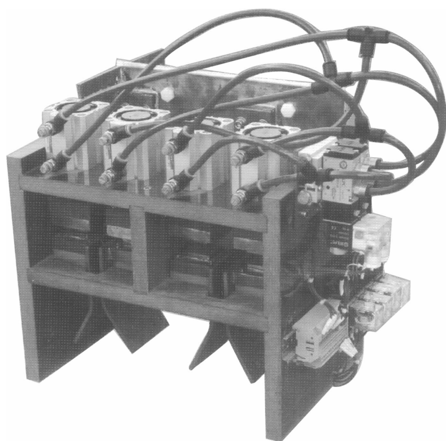


图 8-53　两台式功率切换器

293. 什么是接地故障断流器？

感应加热时，感应器如果与工件或机床零件相碰，就会烧坏工件或感应器。接地故障断流器是一个巧妙的传感器，它是断开工件或机床零件与感应器相碰的机械装置。在感应器或调整工具严重损坏之前，两个故障继电器能发送信号到机床的控制器，这样，正在进行的机床功能即被停止。此巧妙的传感器的反应速度极快，不超过 16.6ms。

接地故障断流器比传统的接地检出器更巧妙。它有两种工作模式：一种模式是工件或机床零件在加热循环之前动作；另一种模式是发生在感应器正通电处于加热循环时。

工件上粘附的铁屑或淬火液杂质能导致临时性的接地，传感器将实际循环中的预热动作分离。当高频电源断开时，传感器将发出一个信号，表示线圈接地比预定的电阻 1Ω 略低，此动作只能设置在 0.2～10A 范围。当在加热过程中接地时，允许接地电流为 0.5～10A 范围内，可用屏板上的电位计进行调节，此传感器反应速度极快。

294. 什么是能量监控器？

感应加热的主要工艺参数有加热功率（kW）与加热时间（s）。如果工作时功率波动或时间波动超过一定范围，就会使工件加热温度波动，对淬火工件质量产生影响。早期的感应加热设备，对加热温度采用控制加热功率与加热时间的方法；对于电源电压波动，则采用稳压等措施。随着控制仪器的研制开发，用能量 kW · s 值直接控制加热工艺的能量监控器被用于生产。此能量监控器可以设定上、下限值，如果生产过程中能量超限，会自动停机。它的面板较大，便于观察，其下面有上、下限设定值，右边为过值、合格及欠值三档。此监控器还有计数功能，需要时还可选装打印机作为记录档案。



图 8-54　TOCCO 感应加热线圈能量监控器

TOCCO 感应加热线圈能量监控器如图 8-54 所示。它的特点是

直接从感应线圈上测量能量，使淬硬层图形与深度的控制更加精确；另外，此监控器还提供线圈电压、电流、功率、功率因数、加热时间、线圈阻抗与频率的实时监控。

此监控器具有柔性，通过转换开关，能用于中频或高频电源。中频模式：适用频率为 3 ~25kHz、功率范围为 1 ~ 几千 kW，能用于任何形式的中频电源；高频模式：适用频率为 25 ~450kHz、功率范围为 1 ~ 1000kW，能用于固态或电子管式电源。此监控器能独立工作，或接入程控器，用于故障检测，并备有两个故障继电器，每个继电器均有 kW · s 值或加热时间限值，以便单个监控器在淬硬与回火在同一周期发生的情况下应用。

295. 什么是功率分配器？

功率分配器也称功率脉动（Power pulse）。用半环型感应器对曲轴颈圆角加热时，由于轴颈上止点与下止点旁的金属质量相差较大，因此吸收磁力线与传热效果也不同。如果不进行功率分配，其加热的效果是轴颈上止点两侧温度要比下止点两侧温度为高，其差异与功率密度、曲柄结构、有效圈结构等因素有关。所谓功率分配，就是在旋转加热时，当半环型感应器中心处于轴颈上止点时，它所施加的功率比它位于下止点时功率为小，这样调整了原来上止点温度高与下止点温度低的差异。有一种功率分配器是一组限位块与一组接近开关相结合的机械装置，随着曲轴的旋转，托架升降运动，固定在托架上的限位块使接近开关动作，接近开关控制中频功率的大小，这样可以在轴颈的每个回转过程中，改变它的功率。一般上止点位置的功率比下止点位置的功率小 30% 左右，根据具体情况调整确定。另一种对上止点降温的方法是局部浇水，通过与曲柄相碰的凸轮，使冷却水只浇到上止点区域。

296. 流量监控用在哪些方面？常用哪些流量计？

流量监控用在以下方面：

1）关键部分的保护监控，例如电子管高频设备的振荡管水路和某些感应器水路的保护，当水流量小于设定值时，设备会自动关机或不能启动。

2）监控淬火冷却介质的流量。当淬火冷却介质流量低于或高于设定量时会自动报警，提醒操作人员进行处理。淬火冷却介质流量是一个十分重要的工艺参数，淬火冷却介质的流量与温度的变化，均直接影响淬火件的质量（硬度与淬硬深度）。



图 8-55　指针式流量计外观

3）制造感应器时用以监测感应器出水量是否达到技术要求。

现在常用的流量计有指针式与涡轮式等多种。其规格也随使用要求而定，如用于一般感应器检测，最大 40L/min 的流量已足够应用。图 8-55 所示为一种指针式流量计。

297. 淬火机床上哪些阀件与管件是必要的？其功能如何？

（1）电磁水阀　它能准确地控制喷液开始与停止时间，对自回火工件尤其重要。由于电磁水阀在淬火冷却介质混入杂质颗粒时会产生故障，因此，将电磁水阀结构进行叙述，便操作人员能自己排除故障。

早期的电磁水阀是采用活塞式结构，利用压差原理，使活塞开闭，动作十分准确可靠。如图 8-56 所示，当电磁线圈不通电时，水阀处于关断位置，此时活塞上下部位均充满淬火水，活塞上内腔 3 的水是通过槽孔 2 从下进入的，小活塞 8 的针阀将出水口封闭，此时，大活塞 9 由于上、下二面均有相同水压，处于平衡状态，将进水与出水通道关闭，淬火水路不通。当电磁线圈 6 通电时，线圈将铁心 4 吸起，带动小活塞 8 上升，在将槽孔 2 通道堵塞的同时，内腔 3 内的水通过小活塞上一圈小孔和针孔排出，此时，内腔 3 无水、无压力，大活塞 9 底下则有压力，将大活塞顶起，电磁阀开启，淬火液从电磁阀流出。当电磁线圈 6 断电时，铁心 4 下降，弹簧 7 的推力使小活塞 8 下降，封闭针阀孔，槽孔 2 又进入压力水，大活塞 9 的两端压力平衡，大活塞下降，电磁阀通道关闭，此动作极为准确与可靠。

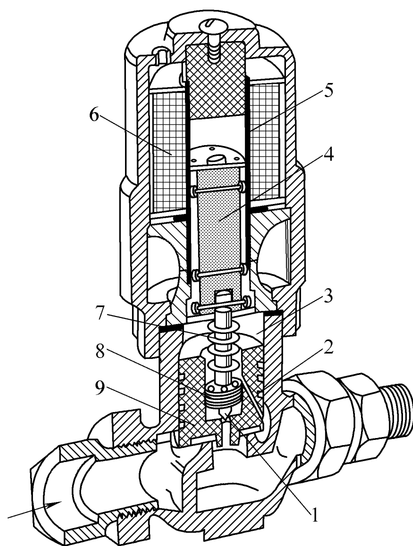


图 8-56　活塞式电磁水阀
1—针阀　2—槽孔　3—内腔　4—铁心
5—非磁性金属的防水套　6—电磁线圈
7—不锈钢弹簧　8—小活塞　9—大活塞

后来，电磁阀改用如图 8-57 所示的橡胶膜结构，将橡胶膜代替大活塞，仍是采用压差原理，但进水孔槽没有小活塞阻断结构，利用进水孔径小，出水孔径大的压差原理，开启与关闭进、出水通道。其缺点是产生延时关闭，不如活塞式结构关闭得快。目前市售电磁阀，通径在 76mm（3in）以下。

（2）单向阀　当感应器喷液完成后，淬火零件被取走，新的一个零件又将加热，如果电磁阀后的管路较长，此时，管路虽已切断，但管内的余水仍会小量流淌出来，影响淬火工艺的稳定。现代化淬火机床，在电磁阀后、感应器前装一个单向阀，只有压力大于一定值时，此阀才能打开，它消除了管路中余水下滴的弊病。

图 8-58 所示为单向阀的结构。单向阀中的弹簧可以根据所需开启压力的大小来选定，这样保证了余水不再下滴，不再影响下一个工件的加热温度。

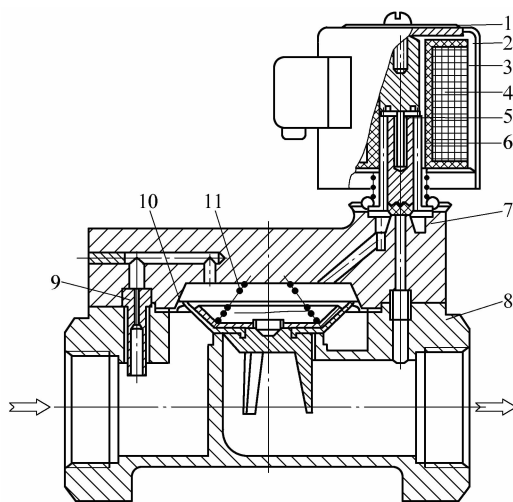


图 8-57　橡胶膜结构的电磁阀
1—铭牌　2—罩壳　3—线圈　4—固定铁心　5—导阀弹簧　6—活动铁心　7—阀盖　8—阀体　9—过滤器　10—膜片　11—弹簧

（3）快换管接头　感应器或喷液部分的换接，用快换管接头能大大提高工作效率。国内外均有许多型号的快速管接头标准件，其通径从 6mm（1/4in）到 25mm（1in），可以任意选用。其中较常用的是如图 8-59 所示的直通式快换管接头，结构较简单，帽套后拉，套入插头，放松帽套，钢珠进入 V 形槽即固定好。另一种快换管接头，内部装有单向阀，只有插头进入帽套，顶开单向阀，管路才接通，插头拔出单向阀即将管路封闭。这种阀如图 8-60 所示，它适用于不用电磁阀的扫描淬火管路。

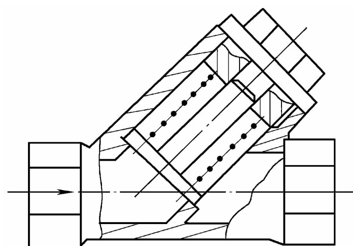


图 8-58　淬火水管路中的单向阀

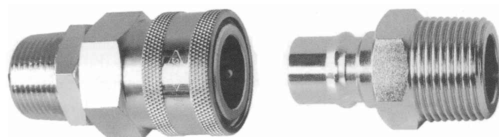


图 8-59　直通式快换管接头

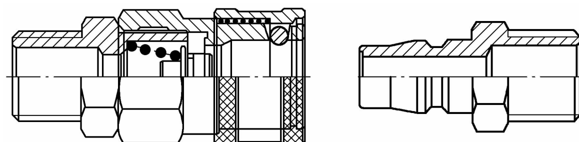


图 8-60　带单向阀的快换管接头

（4）温控阀　通过温度传感器设定所需温度，当温度超过设定值，温控阀开启。此温控阀一般安装在换热器的工业用水进水管路中，传感器则放到所需测定温度的管路或液槽中，一般用以自动控制淬火液的温度。当所控淬火液温度超过设定

值时，温控阀自动打开，换热器中工业用水开始循环，使淬火液降温；达到设定度值以下时，温控阀自动关闭。此种温控阀亦称温度感觉仪，与调节阀配套用，设定温度范围一般为 0 ~ 70℃。

298. 感应加热装置对冷却水的哪些项目指标有要求？

（1）电阻率　如果此值低，则流经感应线圈、水冷电缆橡胶管及振荡管阳极内的冷却水，流向地线的漏电流变大。

（2）pH 值　从防腐蚀作用考虑，pH 值高（弱碱性）有益处。当 pH 值 > 7，$CaCO_3$ 等向管内的析出量增加，此析出膜有防腐蚀作用；> 8 会产生铁锈；< 6 会对黄铜产生腐蚀。

（3）全硬度、钙硬度、镁硬度　这些值增高，导致管壁附着量增大，因而降低了铜管的热传导率；当铜管的温度升高，结垢会加快，会使通水截面减小，降低水流量。

（4）氧消耗量　此值表示微生物含有量，微生物多时，管内生长藻，易导致管子堵塞，损坏仪器。此值高时，有必要灭菌。

（5）氯离子　此值高时，会引起腐蚀破坏，对铜管进行溶解，对铁管产生锈蚀。如果此值超过 50×10^{-6}，有必要用脱离子装置进行精制。

299. 感应加热装置对冷却水质的具体要求有哪些？

早期的冷却水系统主要用软化水，如蒸馏水、池内加散热器，接上水泵、压力表管道，即满足电子管高频设备的要求。设备冷却水排水口是外露的，便于观察及检查温度，水箱与管道常采用铁金属材料。维护措施是定期清理水箱杂质，或在水槽设计上分成两格：一格为沉淀池，接回水管；另一格为洁净池，接水泵吸水口。两个格子在上部是相通的，沉淀池的水从上部流到洁净池。

这种冷却水系统从 20 世纪 70 年代开始已进行了极大的改变。首先是由于可见的排出水内含有空气，影响冷却效果；其次是使用钢材制水槽与镀锌钢管等管件，易导致水中氧化铁的存在。在进水管过滤器堵塞等故障发生前如何监控，这需要有相应的监控仪表；而如何节省换热器中的工业用水，亦是完善该系统必须考虑的问题之一。

早期的前苏联高频设备，对冷却水的水质规定为水中含盐量小于 0.17g/L，电阻 > 4000Ω/cm^3，这是为了振荡管阳极上直流电压达到 13.5kV 而提出的。水中盐含量高，水的电阻值小，会导致阳极上高压通过水流漏电而接地。水中盐含量高的另一弊病是会在振荡管阳极产生水垢，影响阳极的散热，对出水温度高的感应器亦有同样损害。曾经在用硬水冷却的高频设备的管路阀门等通道检修中，发现因严重结水垢而使通水截面减少，从而导致冷却水量大大减少的现象。这些设备原来只有水压保护，而水压保护对流量减少不起保护作用。因此，流量保护成为现代感应加热设备的报警元件之一。

现代感应加热设备对冷却水的水质一般有严格要求。

（1）德国 AEG-Elotherm 公司对水质的要求

1） 机械洁净度。洁净、无雾状、无沉淀，过滤器网眼宽度 0.38mm。

2） 化学性。应呈中性。

3） 电导率最小值为 50μS/cm。对于中频设备，电导率最大值为 600μS/cm；对于高频设备，电导率最大值为 400μS/cm。

4） 单项指标硬度大于 1°d、小于 6°d（德国硬度）。

5） pH 值。当硬度在 6°d 时，pH 值 <8.1；当硬度在 4°d 时，pH 值 <8.3。

6） 游离 CO_2。当硬度在 6°d 时，游离 CO_2 含量应≤8mg/L；当硬度在 4°d 时，游离 CO_2 含量应≤7mg/L。

（2）西班牙一家公司对水质的要求

1）电导率在 180～220μS/cm，硬度 <15°f（法国硬度）。

2）$CaCO_3$ 含量 <150mg/L。

3）$MgCO_3$ 含量 <60mg/L。

4）氯化物含量 <150mg/L。

5）硫化物含量 <250mg/L。

（3）日本一家感应加热公司对曲轴感应加热装置的水质提出的要求

1）外观无色。

2）电阻率在 4000Ω · mm 以上。

3）pH 值为 6.5～7.5。

4）全硬度：$\leqslant 40 \times 10^{-6}$。

5）钙硬度：$\leqslant 30 \times 10^{-6}$。

6）镁硬度：$\leqslant 10 \times 10^{-6}$。

7）氧消耗量（有 $KMnO_4$ 的酸性氧化物）$\leqslant 2 \times 10^{-6}$。

8）氯离子（Cl^-）的质量分数 $<15 \times 10^{-6}$。

9）硫酸离子（SO_4^{2-}）的质量分数 $<20 \times 10^{-6}$。

10）钙离子（Ca^{2+}）的质量分数 $<15 \times 10^{-6}$。

11） 镁离子（Mg^{2+}）的质量分数 $<2 \times 10^{-6}$。

12）铁离子的质量分数 $<0.3 \times 10^{-6}$。

13） 溶有铁离子 $<0.03 \times 10^{-6}$。

14） 蒸发残留物 $<120 \times 10^{-6}$。

认为大部分工业用水在此标准内。

（4） 国内高频设备对水质的要求

1） 盐含量 <0.17g/L。

2） 电阻 $>4000\Omega/cm^3$。

（5） 国产中频淬火变压器对水质要求

1） pH 值为 6 ~ 9。

2） 总固体含量 < 250mg/L。

3） 硬度 < 10°（1° = 10mg/L CaO），即德国硬度 < 10°d。

300. 设计感应加热装置冷却系统及管路时应注意哪几方面？

1） 管路材料尽可能使用铜管及不锈钢管，防止锈屑进入零配件中。近年来，塑料槽也使用作冷却水槽，合乎耐压要求的塑料管也开始用于水路系统。

2） 进、出水管径要根据实际进、排水量来设计。进水管是压力管，出水管有密闭回水管与自压回水管之分，前者有压力，管径相对可小些；后者无压力，管径就要大许多。淬火冷却介质排水量对一次淬火件是间断性的，而扫描淬火件则延续时间较长，还有过滤网阻力等，必须考虑进去。曾见过许多淬火机排出口设计小了，与未考虑到这些因素有关。

3） 冷却水尽量避免与空气接触，以免水中因含气泡而降低水的冷却效果，特别是对高载流密度的感应器更应注意此点。

4） 冷却水槽的容量应根据具体条件考虑，在有换热器条件下，最小的冷却槽容量也应保证其容量能充满输出管道后还有足够的存储量，经验数据是所需每分钟冷却水流量的 3 ~ 4 倍。冷却水槽容量越大，散热条件越好，可以减少换热消耗，但占用更多的生产地空间。

5） 冷却水温度控制。冷却水的进水温度并不是越低越好，因为进水温度过低，会使受冷元件表面凝聚水珠（出汗现象），使电气绝缘性能下降，产生故障。因此，冷却水进水温度应接近室温，但不应 > 28℃。

6） 冷却水的压力根据受冷元件而定，可通过分路阀门调控。一般感应器冷却水压要求最高，其他电器要求水压均较低。特别像电子管高频设备的振荡管，阳极冷却水压一般大于 0.12MPa，小于 0.2MPa 等，必须参照说明书要求配置。冷却水的出水温度亦应根据相关说明进行监测，一般温升过大时，常是故障状态，出水温度一般不应超过 55℃。

7） 换热器的换热量。冷却水系统换热器的换热量大小，与设备的使用功率、负载系数及某些部件效率有关。由于变频电源转换效率的提高，如固态电源的效率为 90% ~ 95%，因此，设备产生的热量已越来越少，一般小于设备功率的 10%（电子管高频设备除外）；母线损耗 < 5%；电容损耗约为 2%；淬火变压器损耗为 11% ~ 15%；感应器损耗约为 21%；而工件上得到的功率在 50% ~ 55% 之间。图 8-61 所示为现代感应器加热电源各部分功率消耗比值。

从图 8-61 可知，电器设备冷却水系统换热器所需功率容量为电源功率的 45%，而淬火水系统换热器所需功率容量为电源功率的 55%，即 100kW 的现代变频电源，如果满功率运行，其设备冷却水系统的换热器容量应为 45kW（38718kcal/h）。而

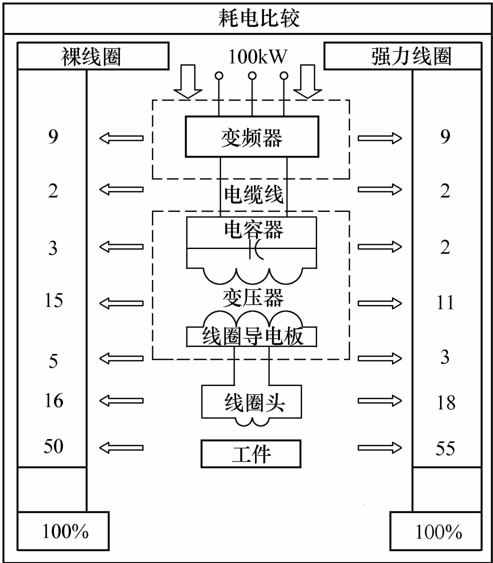


图 8-61 现代感应加热电源各部分功率消耗比值

淬火水系统的换热器容量应为 55kW（47322kcal/h）。实际上满功率 100% 负载率的情况很少，因此，上述容量均应乘上系数 K（$K<1$），根据使用功率与负载率而定。

8）一个系统中的管件，尽量使用同一种金属，否则管道会产生电蚀。

9）管道排列既要整齐，又要求尽量减少拐弯，以减少阻力。另外，对喷液器从一个分配器出来的多根供水管，应力求同等长度，以使喷液均匀。

301. 设计淬火冷却介质管路时应注意哪些方面？

（1）槽的容量 槽的容量与冷却水槽相似，但淬火冷却介质槽与机床机械升降机构一体时，由于管路较短，为减小床身体积可以设计得小些，以能够满足淬火水泵循环供应即可以。

（2）淬火冷却介质供应量 淬火冷却介质供应量与淬火水泵的流量有关，而此流量又取决于工件一次淬火表面积与所需喷淋密度［mL/（cm^2s）］，即每平方厘米面积上每秒得到的喷水量（mL）。不同钢材、不同加热方式的喷淋密度见表 8-6。日本一些厂有采用 20～30mL/（cm^2s）的。

表 8-6 淬火冷却介质的喷淋密度推荐值

类别	喷淋密度/［mL/（cm^2s）］
一般表面淬火	10～15
透热淬火	40～50
低淬透性钢淬火	60～100

（3）淬火液的过滤　过滤网孔的大小是喷液孔径的函数，普通纤维或铁粉的直径常在 70 ~ 100μm 之间，喷液孔径越小则要求滤网越细，喷液孔径一般不小于 1mm，因此要求滤网孔径小于 1mm，实际生产中应用 0.3 ~ 0.8mm，滤网过细既增大阻力，在一定管径下，通道面积亦减少。

（4）喷液孔数量　关于感应器有效圈上喷液孔的数量，一般规定为 3 ~ 4 个/cm^2，孔不要过密。由于孔径有大有小，有资料推荐，有效圈上的喷液孔截面积应小于淬火表面积的 15%，大于淬火表面积的 5%。

（5）喷液器进口管面积　喷液器进口管总截面积与喷液孔总截面积之比应尽可能为 1∶1，在淬火水泵压力足够大时（如 0.4MPa 以上），可以改变此比值，但以不超过 1∶2 为宜。

（6）喷液压力　一般喷液压力为 0.1MPa 时，即能淬硬中碳结构钢。但实践中发现，喷液压力越大，冲刷表面薄的氧化皮的作用越显著，对易淬裂的工件，喷液压力要慎重考虑。

302. 感应加热装置使用的测温仪器有哪些？

感应加热的特点是加热速度快，每秒一般在几十至几百摄氏度，甚至达到每秒上千摄氏度。这样快的加热速度，用一般高温计无法测量，必须用红外测温仪或红外光导纤维比色仪测温。这些测温仪已应用于滚珠丝杠、机床导轨、石油管、PC 钢筋感应淬火生产中，在 PC 钢筋感应淬火生产线上已成功地用于闭环控制。

（1）01-T6 系列光学创新型测温仪　01-T6 系列光学创新型测温仪如图 8-62 所示。其原理是光纤掺入不同材料，调节窗口波长，又利用光纤的空间滤波效应，使入射光波从空间瞬态变为空间稳态，并根据热源温度选择紫外线、可见光线和红外线等工作波段，达到被测温度、光纤选择和光电转换三部分的最佳组合。

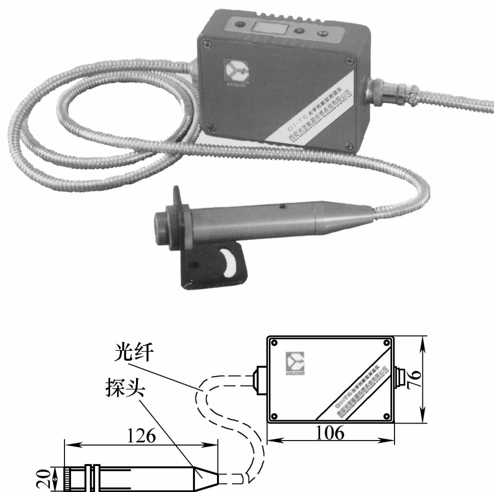


图 8-62　01-T6 系列新型光学测温仪

其测温范围为 250 ~ 3000℃，分段基本误差为 5%（量程上限），分辨率为 0.5℃，响应时间小于 1ms，最小测量直径为 ϕ6mm（目标距离为 250mm 时），有多种规格与测量范围，感应淬火一般可选用 300 ~ 1200℃ 或 500 ~ 1300℃ 范围。

（2）MS 型红外测温仪　MS 型红外测温仪如图 8-63 所示。其工作原理是通过

测量目标发出的红外辐射强度，计算出物体的表面温度，是非接触式测温仪。MS 型红外测温仪是一种便携式测温仪，只有 150g 重，体积为 190mm × 40mm × 45mm。其测温范围为 −32 ~420℃ 及 −32 ~530℃，响应时间为 300ms，测温精度为 ±1%。在感应加热领域里，它可用于回火温度的测量。

（3）测温笔　测温笔是用两种不同温度变色笔来测试工件表面温度的。相邻的两支变色笔同时划涂测试表面，测温笔上的涂料变色，提示温度已大于该笔的标定温度，而涂料未变色的提示测试表面的温度低于该笔的标定温度。这种测温笔在国外公司仍有产品，主要用于测量焊接件的表面温度，感应回火或自回火也可使用此种测温笔。



图 8-63　MS 型红外测温仪

303. 感应加热装置在什么工作条件下使用机器人或机械手？

早在 20 世纪 80 年代，机器人已在感应淬火机床上应用。采用机器人操作，主要应用在以下几个方面：

1）工件笨重。采用机器人操作可以减少操作者的劳动强度，并提高生产率。例如：EFD 公司在 CIHM x x-R 曲轴淬火机床上，应用机器人装卸轿车曲轴，生产率最大可达 60 件/h。

2）多工件装卸。多轴淬火机床的发展，使操作者不能一次装卸多根工件，只能利用机器人。SAET 公司采用的机器人，一次可装四根长 1000mm 的轴。

3）热工件装卸。飞轮齿圈淬火后，原来应采用工频加热，热装到飞轮上，用冷缩配合固定到飞轮上。现在采用机械手，可以将淬火后正在自回火的飞轮齿圈，趁热直接套到飞轮上进行热装，使工序减少。因此，采用机械手是十分符合劳动保护条例的。

4）在感应加热浸渗等化学热处理中，机器人的作用还能得到进一步的发挥。

5）利用机器人操作，进行感应淬火先进工艺的表演。在美国 ASM 热处理展览会上，应用机器人操作感应器进行曲面感应淬火，宣传了感应器上跨装导磁体后的增强集中磁场作用。

参 考 文 献

[1] 沈庆通，梁文林．现代感应热处理技术[M]．北京：机械工业出版社，2008.

[2] 沈庆通．感应热处理问答[M]．北京：机械工业出版社，1990.

[3] Zinn S，Semiatin S L. Elements of Induction Heating[M]. Ohio：ASM International，2002.

[4] Valery Rudnev，Don Loveless，et al. HANDBOOK OF INDUCTION HEATING[M]. New York：Marcel Dekker AG，2003.

[5] Walfgan Schwenk. Induction Hardening-Fundamental Basics and Practical Examples of the simultaneous Dual Frequency Method [J]. Heat Processing lssue，2006(1)：46-49.

[6] Alfred Muhlbauer，History of Induction Heating and Melting[M]. Essen：VULKAN-VERLAG，2008.

[7] 日本热处理技术协会．热处理指南[M]．刘文泉，等译．北京：机械工业出版社，1987.

[8] Lupi S，et al. Induction Heating Industrial Applications [M]. Paris：U. I. E，1992.

[9] 潘天明．现代感应加热装置[M]．北京：冶金工业出版社，1996.

[10] 沈庆通．感应器节能与制造技术[J]．金属热处理，2003(8)：38-44.

[11] 林信智．感应器的选用、设计与制造[M]．北京：机械工业出版社，1991.

[12] 北京机电研究所．先进热处理制造技术[M]．北京：机械工业出版社，2002.

[13] 沈庆通．淬火感应器设计与制造的新发展[J]．金属热处理，1998(6)：1-3.

[14] 沈庆通，张宗杰．强力感应器与导磁体的发展[J]．金属热处理，2001(8)：47-49.

[15] 林信智，杨连弟．汽车零部件感应热处理工艺与设备[M]．北京：北京理工大学出版社，1998.

[16] Orto Carsen，Stelan Dappen，et al．“Go hard into the Wind”-Induction hardening of large rings for wind turbines[J]. HEAT PROCESSING，2010(1)：71-75.

[17] Valery Rudnev，et al. Handbook of Induction Heating[M]. Michigan：Inductoheat，Inc，Madison Heights，2004.

[18] NEMKOV Valentin. 先进的感应热处理技术和设计方法[J]．热处理，2010，25(4)：16-21.



本书主要由我国毕生从事感应热处理技术工作的沈庆通先生编写，沈先生是热处理教授级高级工程师，曾编著出版了《感应热处理问答》、《现代感应热处理技术》等技术图书，参加了《热处理手册》第4版的修订工作。



本书以问答的形式全面系统地介绍了感应热处理技术，主要内容包括：感应加热物理基础、感应加热电流频率的选择与电源功率的估算、钢铁感应热处理工艺基础、感应淬火件的力学性能与结构设计、感应热处理的工艺调整与典型零件感应热处理工艺、感应淬火件的质量检验与控制、感应器的设计与制造、感应淬火机床的结构与性能，共计300多个问题。

地址：北京市百万庄大街22号
邮政编码：100037
电话服务
社服务中心：010-88361066
销售一部：010-68326294
销售二部：010-88379649
读者购书热线：010-88379203
网络服务
教材网：http://www.cmpedu.com
机工官网：http://www.cmpbook.com
机工官博：http://weibo.com/cmp1952
封面无防伪标均为盗版

上架指导 工业技术/机械工程/热处理

ISBN 978-7-111-42072-9

策划编辑◎陈保华



定价：35.00元